

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响

张万锋, 杨树青*, 孙多强, 靳亚红, 娄帅, 刘鹏

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探究不同秸秆覆盖方式与氮减施对土壤氮分布、地下水氮污染及夏玉米产量的影响, 于 2017~2018 年在河套灌区开展田间试验。本试验设置常规施肥为对照(CK 处理), 以 30% 氮减施(N1)、20% 氮减施(N2)和 10% 氮减施(N3)为 3 个减施水平处理, 每个减施水平设秸秆表覆(B 处理)和秸秆深埋(S 处理)这 2 个处理。结果表明, CK 土壤氮随土层加深呈波状分布, 总体呈降低趋势; 秸秆表覆的氮素在 0~20 cm 土层表聚, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量较 CK 平均提高 22.2% 和 42.7%, 随土层加深而降低; 秸秆深埋的氮素在 20~40 cm 土层聚集, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量较 CK 平均提高 29.8% 和 48.1%, 随土层加深呈先增后降趋势; 不同秸秆覆盖下氮素聚集量随氮减施水平提高而减小。收获后, 在 >80 cm 土层, 秸秆表覆的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 累积量较 CK 平均降低 19.9%~58.2% 和 31.1%~61.7%, 而秸秆深埋平均降低 36.7%~70.9% 和 82.6%~89.2%, 效果较秸秆表覆显著($P<0.05$); 秸秆表覆仅 BN3 较 CK 平均增产 0.4%, 秸秆深埋 SN2 较 CK 平均增产 9.3%; 夏玉米产量与氮减施水平的拟合结果表明, 秸秆深埋较秸秆表覆增产效果显著($P<0.05$), 秸秆深埋与 14%~20% 氮减施增产效果最优; 秸秆覆盖与氮减施可缓解氮素淋溶损失, 收获后秸秆深埋显著降低地下水氮污染风险($P<0.05$), 达到改善灌区农田生态环境和提高夏玉米产量的目的。

关键词: 秸秆; 氮素; 地下水; 环境; 河套灌区; 夏玉米

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0786-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202006213

Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution

ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing*, SUN Duo-qiang, JIN Ya-hong, LOU Shuai, LIU Peng

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: To explore the effects of straw mulching and reduced nitrogen fertilization on the temporal and spatial patterns of soil nitrogen, groundwater nitrogen pollution, and summer maize yield, field experiments were carried out in the Hetao irrigation district in 2017 and 2018. The experiment involved the following seven treatments: a control (CK) treatment involving conventional fertilization and traditional tillage, and conventional nitrogen applications reduced by 30% (N1), 20% (N2), and 10% (N3) coupled with either straw surface covering (B) or deep straw burial (S). The results showed that the distribution of soil nitrogen in the CK treatment varied depending on soil depth, with an overall decreasing trend. In the 0-20 cm soil layer under straw surface covering (B) treatments, soil nitrogen was superficially accumulated. NO_3^- -N and NH_4^+ -N content increased by an average of 22.2% and 42.7% compared to the CK treatment, respectively, which decreased significantly at first and then increased slightly with depth. In the 20-40 cm deep soil layer under the deep straw burial (S) treatments, soil nitrogen accumulated and the content of NO_3^- -N and NH_4^+ -N increased by an average of 29.8% and 48.1%, respectively, compared to the CK treatment. Nitrogen accumulation first and then decreased significantly with depth. Nitrogen accumulation under the different straw mulching regimes increased with an increase in the application of reduced nitrogen. After the harvest of summer maize, the accumulation of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in the >80 cm soil layer under the B treatments was 19.9%-58.2% and 31.1%-61.7% lower than that of the CK treatment, respectively. This compared to reductions of 36.7%-70.9% and 82.6%-89.2% for the S treatments, respectively. Only the BN3 treatment increased accumulation compared with CK by 0.4% on average, while the SN2 treatment resulted in a 9.3% increase. Summer maize yield and relative indexes were also improved relative to the other treatments. Nonlinear fitting of yield and application reduction showed that deep straw burial was better than surface covering at increasing summer maize production. The effect of deep straw burial and 14%-20% application reduction was better. Straw mulching with reduced nitrogen fertilization can limit nitrogen leaching and thereby reduce the risk of groundwater pollution. After the harvest, groundwater quality was classified in the II class, with the risk of nitrogen contamination being lowest under deep straw burial with >20% reduced nitrogen fertilization. These observations show that deep straw deep alongside 14%-20% application reduction could effectively alleviate nitrogen leaching and reduce the risk of nitrogen pollution in groundwater. This approach can help improve the ecological environment and summer maize yields in the Hetao irrigation district.

Key words: straw; nitrogen; groundwater; environment; Hetao irrigation district; summer maize

氮素是作物生长和产量的基本保证,农业生产中为获得高产而大量施氮,但过量施氮不仅对作物增产效果不显著,还导致盈余氮素在土壤积累及渗漏到地下水,成为地下水潜在的污染源,增加农业面源污染风险^[1~3]。减量施氮可从源头控制氮素流

收稿日期: 2020-06-22; 修订日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669019, 51539005)

作者简介: 张万锋(1985~),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向农业水土资源利用与水土环境调控, E-mail: z. wfl23@163.com

* 通信作者, E-mail: nmndysq@126.com

失^[4],减少土壤氮含量,改善地下水环境^[5,6]. 相关研究表明适当氮减施可显著减少土壤氮素盈余量^[7,8]及进入地下水 TN 浓度^[9],极大降低氮素向土壤深层淋溶的风险^[10],减少 N_2O 的排放量^[11],进而改善农田生态环境. 玉米秸秆作为某种意义上的氮素缓释有机肥^[12],其还田已被证实可在作物增产、降低氮素淋失风险等方面具有积极的效果. 秸秆还田可提高土壤保水性^[13],降低土壤无机氮累积量^[14],结合覆膜有效减少氮素淋失量^[15];缓解农田生态环境污染和因化肥过量造成的土壤退化等问题^[16,17],减少流域氮素排放量^[18],有效减缓地下水氮素污染^[19]. 也有研究指出高覆盖量秸秆还田提高了 NO_3^- -N 含量,降低固定态铵含量^[20],使土壤氮素盈余增加,增加了土壤氮素淋失风险^[21];有机肥连续施用提高土壤可溶性有机氮含量^[22],Maeda 等^[23]通过 7 a 试验发现,施用有机肥前 3 a 可实现作物增产和低水平 NO_3^- -N 淋失,但长期仍会导致大量 NO_3^- -N 淋失. 前人研究减施对氮素分布及农田环境的影响,取得积极效果,但秸秆还田对氮素的影响得出的结论存在差异,且关于氮减施与不同秸秆覆盖交互作用对土壤氮素分布及地下水氮素污染评价

的影响鲜见报道.

本研究以减量施氮从源头控制氮素流失与秸秆覆盖拦截氮素迁移过程的交互作用为出发点,分析了土壤氮素时空分布、地下水氮素污染评价及夏玉米产量,以期改善河套灌区农田生态环境及降低农业面源污染风险提供技术支撑和理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2017 年和 2018 年在河套灌区双河镇九庄农业试验示范区展开($40^{\circ}42' N$ 、 $107^{\circ}24' E$,海拔 1 040 ~ 1 043 m),该地区属中温带半干旱大陆性气候,年均降水量约 138 mm,年均蒸发量高达 2 332 mm,春冬地表返盐严重. 试验区土壤类型为中度盐碱土,土壤质地为粉砂壤土,0 ~ 100 cm 土层平均容重为 $1.47 g \cdot cm^{-3}$,平均田间持水率为 22.57%,pH 值为 7.95;供试土壤的养分含量为:有机质 $12.69 g \cdot kg^{-1}$ 、全氮 $0.71 g \cdot kg^{-1}$ 、全磷 $0.34 g \cdot kg^{-1}$ 、水解氮 $32.41 mg \cdot kg^{-1}$ 、速效磷 $9.69 mg \cdot kg^{-1}$ 和速效钾 $214.92 mg \cdot kg^{-1}$. 本研究期间夏玉米生育期内试验区日降雨量和气温变化如图 1 所示.

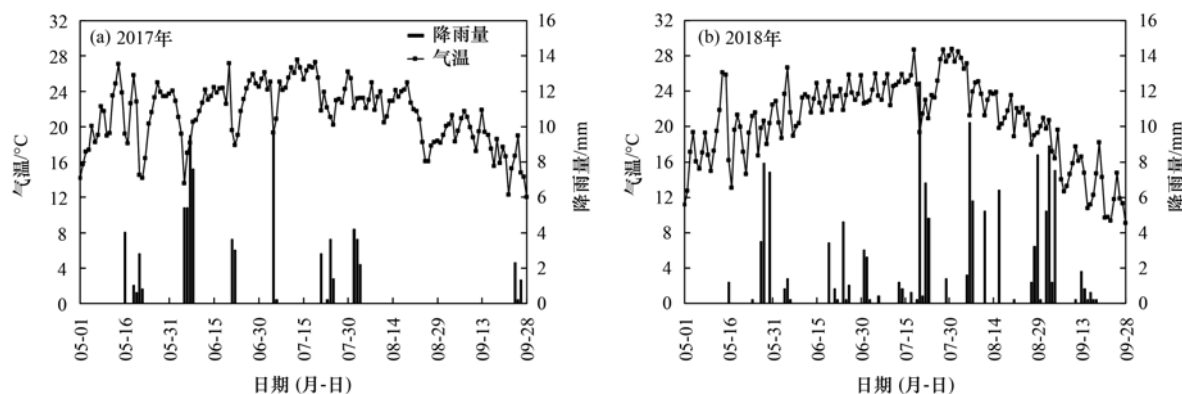


图 1 夏玉米生育期气温及日降雨量

Fig. 1 Daily rainfall and temperature during the summer maize growing period

1.2 试验设计

本试验采用 2 因素裂区设计. 主因素为秸秆覆盖方式,包括秸秆表覆(B 处理)和秸秆深埋(S 处理);副因素为减量施氮水平,包括 30% 减施(N1)、20% 减施(N2)和 10% 减施(N3);以常规施肥量($225 kg \cdot hm^{-2}$,纯 N 含量,在施用时需换算成尿素量)为对照处理(CK),共 7 个处理,3 次重复,随机区组排列. 试验小区面积 $72 m^2$,小区间设 3 m 保护带,四周用埋深 1.2 m 聚乙烯塑料膜隔开,顶部留 30 cm,防止相邻小区水肥影响,并设外围保护行. 具体试验处理如表 1 所示.

1.3 样品采集与检测

(1)土壤氮素采样与测定 在夏玉米拔节期、

抽雄期、灌浆期、成熟期及收获后用土钻在田间分层采集 0 ~ 100 cm 土层土样,分为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 共 5 层,并采用紫外分光光度计测定土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量^[24].

(2)夏玉米产量指标 收获时,对夏玉米考种,测量夏玉米穗长、穗粗等指标;穗粗、穗长用游标卡尺测定,测 5 次,取平均值;对收获的籽粒称重,随机选取 3 个重复,每个重复 100 粒,各自称量,计算夏玉米百粒重.

(3)水样采集与检测 试验小区紧挨灌水渠,受灌水顶托作用,田间地下水位平均为 1.8 m,本试验以 2.5 m 处浅层地下水中的氮素含量作为夏玉米生态系统进入地下水渗漏氮素含量. 采用播种时埋

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

编号	处理	秸秆覆盖方式	施氮量/kg·hm ⁻²	钾肥和磷肥用量	灌溉定额
1	CK	当地耕作模式,无秸秆(对照)	常规施氮量 225	磷肥为磷酸二铵,施磷量按当地水平 150 kg·hm ⁻² (以 P ₂ O ₅ 计); 钾肥为氯化钾,施钾量按当地水平 45 kg·hm ⁻² (以 K ₂ O 计),磷肥、钾肥与 50% 氮肥作为基肥一次性施入,剩余氮肥在拔节期施入	夏玉米采用黄河水灌溉,灌溉水矿化度为 0.608 g·L ⁻¹ ; 全生育期灌水 3 次,单次灌水定额采用示范区优化的灌水定额 90 mm,用汽油泵从水果中定量抽取
2	BN1	覆膜种植后,垄间表覆 5 cm 厚粉碎的玉米秸秆(B 处理)	30% 减施氮肥(N1)		
3	BN2		20% 减施氮肥(N2)		
4	BN3		10% 减施氮肥(N3)		
5	SN1	秋浇前深翻约 35 cm,人工铺设	30% 减施氮肥(N1)		
6	SN2	埋设 5 cm 厚粉碎的玉米秸秆,	20% 减施氮肥(N2)		
7	SN3	第二年机械浅耙耢磨(S 处理)	10% 减施氮肥(N3)		

设安装于各小区的自制渗漏管采样,埋设深度为 4 m,静止 24 h 后取基础水样,随后在抽雄期和收获后取地下水样,测定地下水中 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的含量. 采集水样后立即送往实验室分析测定各形态氮素含量. 据《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T 8538-1995),采用紫外分光光度法测定水样的 NO₃⁻-N 浓度;采用纳氏试剂分光光度法测定 NH₄⁺-N 浓度;采用重氮偶合比色法测定 NO₂⁻-N 浓度.

1.4 数据分析

地下水氮污染风险评价采用模糊综合评价数学模型^[25,26],并选取灌区农田地下水环境典型污染物 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 作为评价指标,因素集 $U = \{ \text{NO}_2^- \text{-N}, \text{NO}_3^- \text{-N}, \text{NH}_4^+ \text{-N} \}$,评判集 $V = \{ \text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}, \text{V} \}$. 各污染物对地下水水质污染程度的贡献,不仅与污染物实测浓度有关,还与地下水水质分类中其他污染物允许的浓度标准值有关,实测同一因素的允许浓度标准值越大对地下水水质污染程度越小. 因此,各因素指标权重值 ω_i 计算如式(1):

$$\omega_i = \frac{c_i/S_i}{\sum_{i=1}^3 c_i/S_i} \tag{1}$$

式中, ω_i 为各因素指标权重值; c_i 为地下水第 i 种污染物实测浓度,mg·L⁻¹; S_i 为第 i 种元素某种用途水浓度标准,mg·L⁻¹. 各因素在地下水中 5 个类别评判标准值参考 GB/T 14848-2017,如表 2 所示.

表 2 地下水水质分类评判标准值/mg·L⁻¹

Table 2 Quality standards for groundwater/mg·L⁻¹

水质类别	I	II	III	IV	V
NO ₂ ⁻ -N	≤0.01	≤0.10	≤1.00	≤4.80	>4.80
NO ₃ ⁻ -N	≤2.0	≤5.0	≤20.0	≤30.0	>30.0
NH ₄ ⁺ -N	≤0.02	≤0.01	≤0.5	≤1.5	>1.5

土壤氮素含量的计算采用等质量法^[27],计算如式(2):

$$M_{\text{TN}} = \sum_{i=1}^5 \rho_i h_i m_i / 10 \tag{2}$$

式中, M_{TN} 为等质量土壤氮素含量,kg·hm⁻²; ρ_i 为第

i 土层的土壤容重,g·cm⁻³; h_i 为第 i 层的土层厚度,cm; m_i 为第 i 层的土壤氮素的实测含量,mg·kg⁻¹.

本试验数据采用 Excel 2010 处理,SPSS 20.0 进行方差分析,采用最小显著差异法(least significant difference method, LSD)进行显著性检验($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 土壤剖面无机氮分布对不同秸秆覆盖与减施互作的响应

2.1.1 土壤剖面硝态氮的分布

夏玉米生育期内各处理 2 a 的 NO₃⁻-N 平均含量在 0 ~ 100 cm 土层分布如图 2 所示. 拔节期,各处理土壤 NO₃⁻-N 平均含量随减量施氮增加而增加,秸秆表覆和 CK 随土层加深而降低,表层最大,秸秆深埋随土层加深呈先增后降趋势;在 0 ~ 20 cm 土层,秸秆表覆土壤 NO₃⁻-N 含量较秸秆深埋和 CK 平均提高 26.7% 和 8.9%;在 20 ~ 40 cm 土层,秸秆深埋土壤 NO₃⁻-N 含量较秸秆表覆和 CK 平均提高 31.6% 和 6.3%. 2018 年秸秆表覆和 CK 在 0 ~ 40 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量较 2017 年显著降低,CK 降低 19.6%,秸秆表覆降低 5.6% ~ 13.8%,且降幅随减量施氮增大而增大;在 > 40 cm 土层 NO₃⁻-N 含量除 BN1 降低 0.6%,CK 提高 8.9%,BN2 和 BN3 分别提高 1.5% 和 5.6%;相比秸秆覆盖和 CK 处理,秸秆深埋的 2018 年土壤 NO₃⁻-N 含量较 2017 年在 0 ~ 20 cm 土层降低 10.8% ~ 28.5%;而 20 ~ 40 cm 土层提高 7.2% ~ 13.8%;在 > 40 cm 土层 2 a 间差异不显著. 可能因 2018 年拔节期降雨量大所致,降雨增加氮素淋溶量,但秸秆深埋形成的隔层拦截氮素向深层迁移,使得 20 ~ 40 cm 土层 NO₃⁻-N 含量提高,而 > 40 cm 土层差异不显著.

与拔节期相比,抽雄期各处理土壤 NO₃⁻-N 含量达到峰值,随土层加深,秸秆表覆和 CK 逐渐降低,尤其在 > 80 cm 土层降幅最大;随减量施氮增加,各土层均有不同程度升高. 秸秆深埋随土层加深呈先

增后减趋势, 40~60 cm 土层较 20~40 cm 土层大幅减少, 约为 55.1%~67.1%, 随减量施氮增加, 减幅随着增大; 秸秆表覆和 CK 在 40~60 cm 土层仅减少了 5.2%~10.5%。说明高施氮水平增加了 NO_3^- -N 在土壤剖面累积, 随土壤水下移, 但秸秆深埋形成的阻碍层减缓 NO_3^- -N 下移, 在秸秆隔层累积。在 40~60 cm 土层, 秸秆深埋 SN3 的 NO_3^- -N 平均含量较 CK 降低 27.1%, 而 BN3 较 CK 仅降低 4.6%。灌浆期 BN2 和 BN3 在 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量较 CK 平均提高 23.5% 和 38.7%, 其他处理与 CK 差异

不显著; 秸秆表覆随土层加深呈先减后增趋势, 增幅较小, 而秸秆深埋呈先增后减趋势, CK 呈波动变化, 总趋势减小。成熟期各处理表层土壤硝态氮含量均显著下降, 减量施氮水平间差异变小; 秸秆表覆表层土壤 NO_3^- -N 平均含量较 CK 提高 5.5%~19.7%, 秸秆深埋较 CK 降低 5.3%~21.8%; 秸秆深埋在 20~40 cm 土层较 CK 平均提高 5.7%~44.4%, 而秸秆表覆处理较 CK 降低 3.1%~27.4%; 在 >40 cm 土层各处理土壤 NO_3^- -N 平均含量随土层加深而降低, 平均降幅依次为 S>B>CK。

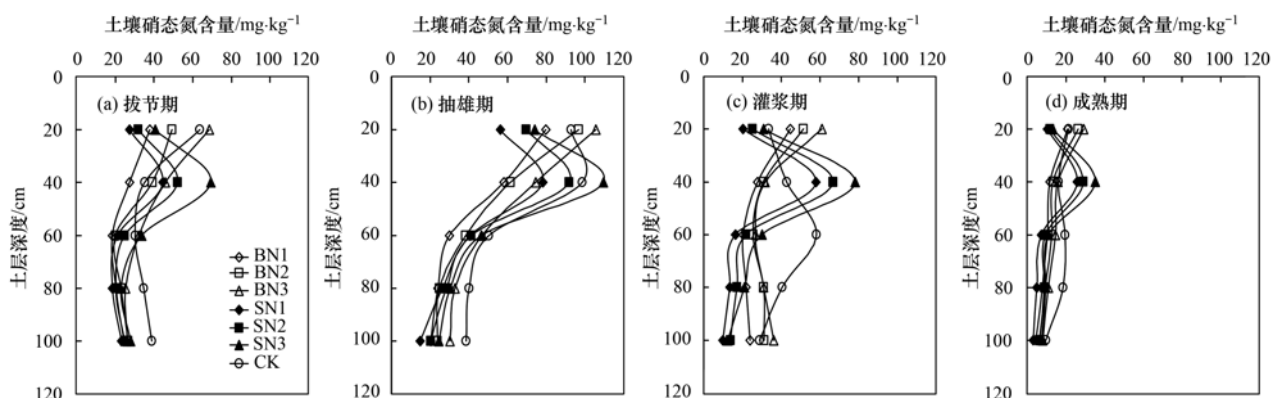


图2 夏玉米生育期不同处理土壤 NO_3^- -N平均含量

Fig. 2 Average soil NO_3^- -N content during the summer maize growth period under the different treatments

2.1.2 土壤剖面铵态氮的分布

夏玉米生育期内各处理 2 a 的 NH_4^+ -N 平均含量在 0~100 cm 土层分布如图 3 所示。 NH_4^+ -N 平均含量在 0.44~13.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间变化, 整体趋势与硝态氮类似, 各处理耕作层的 NH_4^+ -N 平均含量随生育期推移呈先升后降趋势, 抽雄期出现峰值, 后降低, 成熟期降到最低。从秸秆覆盖方式看, 同一减施水平, 在 0~20 cm 土层, 秸秆表覆的 NH_4^+ -N 平均含量较秸秆深埋各处理提高 146.9%~216.5%, 而在 20~40 cm 土层, 秸秆深埋较秸秆表覆各处理提高 136.8%~165.2%; 从减施水平看, 随减施水平增

大, NH_4^+ -N 平均含量逐渐降低, 土层间变化差异较大。秸秆表覆 NH_4^+ -N 表聚, 随着土层加深, 逐渐降低, 但成熟期在 >80 cm 土层有增大趋势; 秸秆深埋的 NH_4^+ -N 在 20~40 cm 土层有聚集现象, 随着土层加深, 呈先增后降趋势, 在 60~80 cm 土层下降幅度最大; 但 CK 各土层无聚集现象, 随土层加深, 整体呈降低趋势, 各土层降幅变化较小, 成熟期 >80 cm 土层有增大的趋势。2018 年秸秆表覆 NH_4^+ -N 含量, 在 0~20 cm 土层增大 1.8%~11.4%, 增幅随减施水平增大而降低; 在 20~40 cm 土层降低; 在 >40 cm 土层逐渐增大, 增幅均小于 2%; CK 处理的 NH_4^+ -N

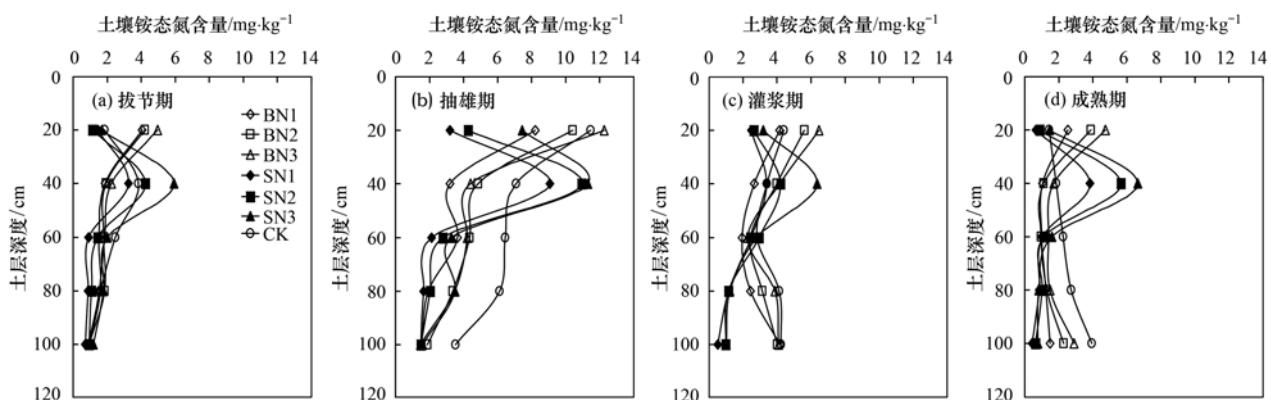


图3 夏玉米生育期不同处理 NH_4^+ -N平均含量

Fig. 3 Average soil NH_4^+ -N content during the summer maize growth period under the different treatments

含量在 2018 年较 2017 年在表层降低,深层增大, 2 a 的土壤 NH_4^+ -N 含量随土层加深而整体降低. 相比秸秆表覆处理和 CK, 秸秆深埋处理的 NH_4^+ -N 含量在 2018 年较 2017 年在 0 ~ 20 cm 土层降低 7.8% ~ 30.2%; 在 20 ~ 40 cm 土层提高 6.6% ~ 20.4%; 在 >40 cm 土层呈降低趋势, 平均降低 2.5% ~ 7.1%, 降幅随减量施氮增加而增大.

2.2 夏玉米收获后土壤无机氮累积量对不同秸秆覆盖与减氮配施互作的响应

2.2.1 夏玉米收获后土壤 NO_3^- -N 平均累积量

夏玉米收获后 0 ~ 100 cm 土层 NO_3^- -N 平均累积量如表 3 所示, 各处理平均在 146.16 ~ 245.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间, 随减量施氮水平增大而降低, 减施量 10% 时, 土壤 NO_3^- -N 累积量最大, 较 CK 平均降低

6.8%, 减氮量越多 NO_3^- -N 累积量越少. 随土层深度加深, 秸秆深埋处理的 NO_3^- -N 累积量呈先增后降趋势, 显著提高 20 ~ 40 cm 土层 NO_3^- -N 累积量, 较秸秆表覆和 CK 平均提高 82.6% 和 30.7%; 秸秆表覆处理随土层加深呈降低趋势, 显著提高 0 ~ 20 cm 土层 NO_3^- -N 累积量, 较秸秆深埋和 CK 平均提高 108.9% 和 47.3%; CK 处理的 NO_3^- -N 累积量分布呈波状, 各土层无聚集现象, 随土层加深整体呈降低趋势. 在 40 ~ 100 cm 土层 NO_3^- -N 平均累积量依次是 CK > B > S; 在 > 80 cm 土层, 秸秆深埋和秸秆表覆处理 NO_3^- -N 累积量分别较 CK 平均降低 53.5% 和 36.7%, 说明秸秆覆盖可显著减少深层土壤 NO_3^- -N 累积量, 降低 NO_3^- -N 向深层土壤淋失的风险, 秸秆深埋效果较好.

表 3 夏玉米收获后不同处理各土层 NO_3^- -N 的平均累积量¹⁾/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 3 Average accumulation of NO_3^- -N under the different treatments after the summer maize harvest in different soil layers/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理	土层深度/cm					合计
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	
CK	46.65c	64.57c	46.79d	55.52e	32.23e	245.76e
BN1	57.13	35.91a	29.85bc	28.14b	13.47b	164.49b
BN2	71.04e	49.76b	38.55d	32.11c	21.94c	213.39d
BN3	77.90f	53.03b	46.33d	36.89d	25.82d	239.97e
SN1	28.79a	71.04d	21.79a	15.17a	9.37a	146.16a
SN2	32.93ab	85.06e	27.67b	27.65b	15.22b	188.53c
SN3	36.88b	97.16f	32.98c	30.62bc	20.43c	218.07d

1) 同列数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同

2.2.2 夏玉米收获后土壤 NH_4^+ -N 平均累积量

夏玉米收获后 0 ~ 100 cm 土层 NH_4^+ -N 平均累积量如表 4 所示, 各处理平均在 21.48 ~ 37.69 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间. 与表 3 相比, 相同处理 NH_4^+ -N 平均累积量显著低于 NO_3^- -N 累积量. 同一秸秆覆盖, NH_4^+ -N 平均累积量随施氮量增加, 呈上升趋势, 减量 10% 处理最大, 较 CK 平均降低 5.9%, 减量越多 NH_4^+ -N 累积量越少. NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 平均累积量变化趋势类似; 随土层加深, NH_4^+ -N 平均累积量在秸

秆深埋下呈先增后降趋势, 显著提高 20 ~ 40 cm 土层累积量; 在秸秆表覆下呈降低趋势, 显著提高 0 ~ 20 cm 土层累积量; CK 各土层 NH_4^+ -N 累积量呈增大趋势; 在 40 ~ 100 cm 土层 NH_4^+ -N 累积量依次是 CK > B > S, 随减氮量减少而增加; 在 > 80 cm 土层, 秸秆深埋和秸秆表覆处理的 NH_4^+ -N 累积量分别较 CK 平均降低 85.5% 和 44.7%, 说明秸秆覆盖可显著减少深层土壤 NH_4^+ -N 累积量, 降低 NH_4^+ -N 向深层土壤淋失的风险, 秸秆深埋效果较好.

表 4 夏玉米收获后不同处理各土层 NH_4^+ -N 的平均累积量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 4 Average accumulation of NH_4^+ -N under the different treatments after the summer maize harvest in different soil layers/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理	土层深度/cm					合计
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	
CK	4.17c	5.30c	6.59e	8.17e	13.47f	37.69d
BN1	7.29d	3.07a	2.91a	3.59c	5.16c	22.01a
BN2	10.50e	3.32b	2.93a	3.65c	7.89d	28.28b
BN3	12.46f	4.69c	5.00d	5.25d	9.28e	36.68cd
SN1	1.94a	12.49d	3.26ab	2.33a	1.46a	21.48a
SN2	2.78b	17.33e	3.43b	2.82b	2.07ab	28.42b
SN3	3.90c	21.08f	4.32c	2.64ab	2.34b	34.27c

2.3 地下水氮污染风险评价

据地下水质量标准(表 2)和不同时期实测地下

水污染物浓度, 依式(1)计算各污染物指标权重值(表 5), 将各污染物实测浓度代入隶属度函

数^[25,26],得到各指标对应地下水质分类的隶属度矩阵,最后依照最大隶属原则分析评判出地下水质类别,即各处理对地下水氮素污染风险评价(因研究期间氮素对地下水环境影响的变化趋势基本一致,此处仅列出 2017 年数据,如表 6 所示,2018 年数据未列出)。

表 5 2017 年各处理地下水中氮素形态指标的权重值

处理	播种期			抽雄期			收获后		
	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
CK	0.251 3	0.399 3	0.349 5	0.422 9	0.307 9	0.269 2	0.226 2	0.424 4	0.349 4
BN1	0.244 1	0.370 4	0.385 5	0.309 7	0.392 5	0.297 8	0.260 1	0.349 7	0.390 2
BN2	0.241 1	0.372 8	0.386 1	0.338 3	0.361 6	0.300 1	0.219 9	0.400 1	0.379 9
BN3	0.249 9	0.390 2	0.359 9	0.393 4	0.329 5	0.277 1	0.209 9	0.417 6	0.372 5
SN1	0.230 1	0.351 8	0.418 1	0.309 4	0.374 1	0.316 5	0.264 5	0.423 1	0.312 4
SN2	0.237 1	0.368 5	0.394 5	0.327 5	0.361 8	0.310 7	0.221 5	0.417 8	0.360 8
SN3	0.250 6	0.397 1	0.352 3	0.315 8	0.374 4	0.309 8	0.187 4	0.438 1	0.374 5

各处理在播种期地下水水质类别均为Ⅱ类,无差异,氮污染风险较小;夏玉米抽雄期,氮素在土壤中氮素含量达到峰值,随土壤水逐渐渗漏进入地下水,对地下水产生不同程度的氮素污染,特别是 CK 和 BN3 的地下水质类别为Ⅴ类,说明高施氮量引起地下水严重氮污染风险,且秸秆表覆对氮素拦截无效,与 CK 无差异;秸秆表覆的高、中减施水平 BN1 和 BN2 地下水质类别为Ⅳ类,存在较严重氮素污染风险;秸秆深埋各处理地下水质类别为Ⅲ类,存在较大氮污染风险,但显著降低了地下水氮污染风险。

说明地下水氮污染风险随减施水平增大而降低,秸秆深埋在一定程度上可拦截氮素下移,降低地下水氮污染风险。夏玉米收获后各处理地下水环境有所好转,除 CK 地下水为Ⅳ类,存在较严重氮素污染风险,其它处理地下水均为Ⅲ类以上;BN2、BN3 和 SN3 的地下水为Ⅲ类,存在较大氮污染风险,而 BN1、SN1 和 SN2 处理地下水提升为Ⅱ类,氮污染风险较小。说明随着时间推移,地下水氮素污染有所好转,相比 CK(Ⅳ类),秸秆深埋处理显著降低地下水氮素污染风险,效果较佳。

表 6 2017 年各处理地下水水质类别¹⁾

生育期		处理					所属类别
		I	II	III	IV	V	
播种	CK	0.067 8	0.427 2	0.359 6	0.145 4	0	II
	BN1	0.070 1	0.438 4	0.394 9	0.096 6	0	II
	BN2	0.074 1	0.460 3	0.384 7	0.080 9	0	II
	BN3	0.069 8	0.441 1	0.373 6	0.115 5	0	II
	SN1	0.138 4	0.447 8	0.413 8	0	0	II
	SN2	0.097 6	0.4835	0.366 4	0.0525	0	II
	SN3	0.080 5	0.442 6	0.401 8	0.075 1	0	II
抽雄期	CK	0	0.127 1	0.293 2	0.245 6	0.334 1	V
	BN1	0.047 6	0.103 2	0.266 2	0.342 9	0.240 1	IV
	BN2	0	0.156 1	0.254 3	0.392 3	0.197 3	IV
	BN3	0	0.093 2	0.251 6	0.291 1	0.364 1	V
	SN1	0.109 5	0.258 1	0.346 3	0.286 1	0	III
	SN2	0.042 6	0.196 8	0.464 5	0.296 1	0	III
	SN3	0	0.090 6	0.350 4	0.349 5	0.209 5	III
收获后	CK	0	0.047 6	0.240 4	0.421 3	0.2907	IV
	BN1	0.035 6	0.350 5	0.267 3	0.166 1	0.180 5	II
	BN2	0	0.157 3	0.442 6	0.310 3	0.089 8	III
	BN3	0	0.208 9	0.389 5	0.217 1	0.184 5	III
	SN1	0.105 6	0.392 5	0.269 4	0.197 1	0.035 4	II
	SN2	0.065 6	0.363 5	0.231 4	0.200 8	0.138 7	II
	SN3	0.017 8	0.238 3	0.340 7	0.221 6	0.181 6	III

1) I ~ V 为地下水质类别;表中数值为地下水水质氮污染类别隶属度矩阵,并依据最大隶属度原则确定不同处理地下水水质氮污染所属类别

2.4 秸秆覆盖与减氮交互对夏玉米产量的影响

夏玉米产量受植株穗长、穗粗和百粒重等指标影响(表 7)。同一减施水平下,秸秆深埋处理的平

均穗长和穗粗较秸秆表覆显著提高;秸秆表覆的穗长和穗粗均随施氮量增加而增大,而秸秆深埋则呈先增后减趋势,SN2 最大,穗长和穗粗较 CK 平均增

加 7.9% 和 7.8% ($P < 0.05$). 秸秆表覆处理中仅 BN3 与 CK 百粒重无差异,其他处理较 CK 显著降低; 秸秆深埋仅 SN1 的百粒重较 CK 降低,SN2 和 SN3 较 CK 平均提高 12.3% 和 6.4% ($P < 0.05$). 同一减施水平,秸秆深埋的夏玉米产量较秸秆表覆平均提高 8.2%、10.8% 和 4.1%,且秸秆表覆的夏玉米产量随施氮量增加而提高,BN3 最高,仅较 CK 平均增产 0.4%,效果不显著; 秸秆深埋的夏玉米产量随施氮量增加呈先增后减趋势,SN2 最大,较 CK 平均增产 9.3%,夏玉米产量与各处理百粒重的变化趋势一致. 2018 年 CK 的产量较 2017 提高 2.9%,秸秆表覆提高 6.9%,秸秆深埋提高 4.1%,说明随降雨增多,秸秆覆盖较 CK 利于作物增产,但秸秆深埋增产效果不显著,其更适宜少雨年份(2017 年). 秸秆覆盖与氮减施在夏玉米农艺性状及产量上存在显著或极显著的互作效应,秸秆深埋与 20% 减施 SN2 增产效果显著,优于其它处理.

为进一步分析不同秸秆覆盖与减氮配施对夏玉米产量影响趋势,采用 SPSS 软件拟合 2018 年秸秆

覆盖各处理夏玉米产量与减施水平间非线性关系. 2018 年秸秆覆盖各处理夏玉米产量与减施水平间关系如图 4(a) 所示,均呈二次函数关系,如式(3)和式(4):

$$Y = -1.10X^2 + 439.93X - 36136,$$
$$R^2 = 0.985$$

(3)

$$Y = -1.27X^2 + 491.97X - 41446,$$
$$R^2 = 0.925$$

(4)

式中, Y 为夏玉米产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; X 为减量施氮水平, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

用 2017 年实测值率定得到图 4(b),结果表明模拟值与实测值相关程度较好,模型可较好地描述在不同秸秆覆盖下氮减施水平与夏玉米产量间的关系. 模拟结果表明,秸秆深埋施氮量为 $193.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,即减量 14% 时夏玉米理论产量最高为 $8348.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 秸秆表覆施氮量为 $200.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,即减量 11% 时夏玉米理论产量最高为 $7850.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,秸秆深埋较秸秆表覆增产效果好.

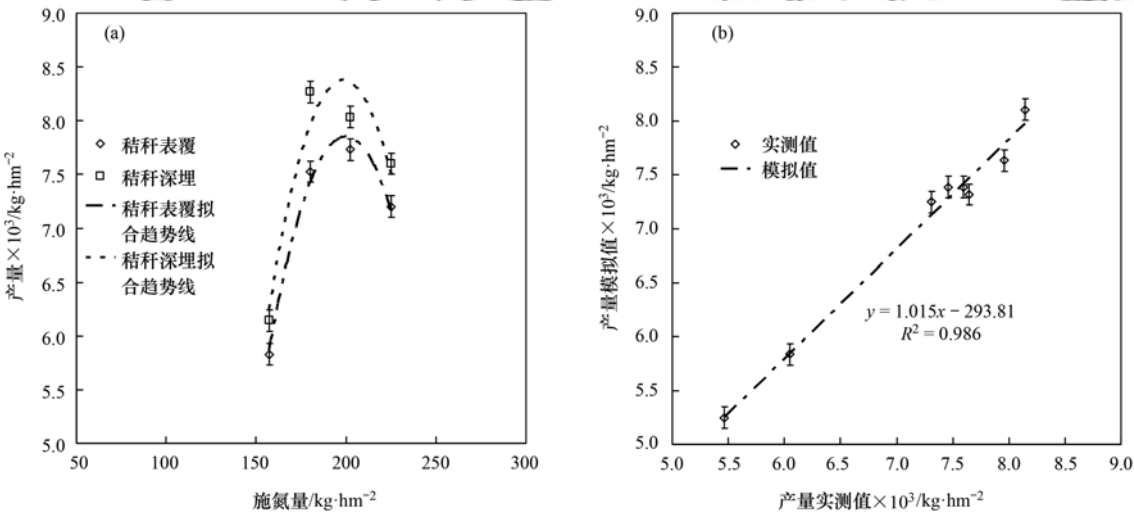


图 4 氮减施水平与夏玉米产量间关系

Fig. 4 Relationship between nitrogen reduction level and summer maize yield

表 7 不同处理夏玉米产量及其指标平均值¹⁾

Table 7 Mean summer maize yields and related indexes under the different treatments

处理	穗长/cm	穗粗/cm	百粒重/g	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	22.16 ± 1.10de	5.06 ± 0.25bc	29.37 ± 1.47c	7492.28 ± 374.62b
BN1	15.93 ± 0.79a	4.12 ± 0.21a	20.86 ± 1.05a	5537.41 ± 276.87a
BN2	19.97 ± 1.00c	4.64 ± 0.24b	26.15 ± 1.31b	7386.84 ± 369.34b
BN3	20.86 ± 1.05cd	5.14 ± 0.26c	29.36 ± 1.47c	7522.91 ± 376.15b
SN1	17.82 ± 0.90b	4.22 ± 0.21a	22.57 ± 1.13a	5990.11 ± 299.51a
SN2	23.92 ± 1.20e	5.46 ± 0.27c	32.98 ± 1.65d	8185.77 ± 409.29c
SN3	23.66 ± 1.18e	5.11 ± 0.26c	31.25 ± 1.56cd	7834.17 ± 391.71bc
秸秆	82.48 **	14.18 **	50.49 **	16.76 **
氮	121.17 **	59.55 **	126.14 **	106.64 **
秸秆 × 氮	3.53 *	16.31 **	11.73 **	12.96 *
R^2	0.917	0.847	0.916	0.886

1) *表示在 $P < 0.05$ 水平显著,**表示在 $P < 0.01$ 水平显著

3 讨论

氮素污染是农业面源污染的主要表现形式,减量施氮可从源头控制氮素流失,提高氮肥利用效率^[28,29]. 本试验结果表明,各处理土壤氮素含量随减施水平提高而显著减少,随着夏玉米生育期推移逐渐降低. 土壤氮素含量与夏玉米消耗和土壤吸附等因素密切相关,同时更受土壤氮素下移量的影响^[30]. 秸秆表覆处理在 0~20 cm 土层的氮素表聚,秸秆表覆处理在 20~40 cm 土层的氮素聚集,且聚集累积量随减施水平提高而减小. 这是因为秸秆还田提高土壤通透性,对土壤氮素具有一定的转化与固持作用^[31],但玉米秸秆 C/N 较高,不易分解,抑制土壤氮素矿化^[32,33],配施适量氮肥可有效提高土壤有机质和脲酶活性^[34],增加亚硝酸细菌等微生物数量,促进氮素累积^[35].

本试验发现在夏玉米生长中后期氮素逐渐往土壤深层迁移,且随减施水平提高而减小,秸秆覆盖可缓解氮素下移趋势. 收获后秸秆深埋显著降低 >80 cm 土层的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 平均累积量,较 CK 平均降低 36.7%~70.9% 和 82.6%~89.2%,且较秸秆表覆的效果好. 另外,对地下水氮素污染评价表明,秸秆覆盖结合氮减施可显著降低地下水水质氮素污染的风险. 相比 CK(Ⅳ类),夏玉米收获后秸秆覆盖的地下水氮素污染有所减轻,以 BN1、SN2 和 SN1(Ⅱ类)对地下水氮素污染风险最低,秸秆深埋处理效果较好. 这是由于秸秆质地粗糙表面积较大,秸秆深埋改变土壤水入渗形式^[36],延长土壤水在耕作层停蓄,有效降低土壤水入渗能力^[37];同时秸秆的强吸附性可提高秸秆隔层持水能力,有效降低壤中流产流量,减少渗漏,减缓了以水分作为垂直运移载体的氮素淋失^[38,39]. 而秸秆表覆处理氮素尽管在表层聚集,但对土壤水分入渗影响不显著,与 CK 类似,不能有效减缓氮素淋失. 另外,氮淋失与作物根系分布密切相关,庞大根系有效提高氮利用率,减少氮素渗漏^[40]. 夏玉米根系主要分布在 0~40 cm 土层,当氮素运移到 >40 cm 土层难再被吸收,而秸秆深埋营造养分充裕的微环境^[41,42],与适宜减氮配施为夏玉米中后期生长提供持续养分,促进根系生长,特别是提高 >40 cm 土层根长密度^[43],促进对深层土壤氮素吸收,减少氮渗漏,进而降低地下水氮污染风险. 然而,常规耕作 CK 因过量施氮导致土壤氮残留较多,易随壤中流运移到 >40 cm 土层,且常规耕作的夏玉米深层根不发达,难再吸收深层氮素,这部分氮素随时间推移会引起地下水氮素污染.

作物产量因施氮产生差异,本质是土壤中能够

被植株吸收的氮素养分间差异^[44]. 玉米秸秆作为某种意义上的氮素缓释有机肥,增加碳氮投入,提高土壤供氮能力^[12,45,46],在作物生长后期将其含有的养分缓慢释放提供给作物^[47],与适量减氮配施可打破秸秆自身养分不足的局限性^[48],实现根层养分供应与作物高产需求的系统平衡,形成良好库-源系统,提高土壤-作物系统氮利用率^[49],达到提效增产的目标. 试验结果表明,夏玉米产量及其指标与秸秆覆盖结合减施氮水平存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的互作效应,秸秆表覆对产量等相关指标提高不显著,随施氮量增加而增大,仅 BN3 较 CK 平均增产 0.4%;秸秆深埋显著提高产量等相关指标,随施氮量增加呈先增后减趋势,SN2 较佳,较 CK 平均增产 9.3%. 通过对夏玉米产量与减施水平拟合表明,秸秆深埋较秸秆表覆增产效果好,当秸秆深埋结合减施 14%~20% 氮肥时,夏玉米可实现增产及有效降低地下水氮素污染风险的目标.

4 结论

(1)与常规施肥耕作相比,秸秆覆盖可显著降低深层土壤氮素累积量($P<0.05$),减少土壤氮素淋溶损失,改善地下水环境,秸秆深埋效果较好.

(2)秸秆深埋与 20% 氮减施 SN2 处理的整体效果较优,平均增产 9.3%,夏玉米收获后在 >80 cm 土层的土壤 NO_3^--N 累积量平均降低 56.8%,土壤 NH_4^+-N 累积量平均降低 84.7%,秸秆隔层形成有效拦截氮素运移的保护屏障,显著降低了地下水氮素污染风险($P<0.05$).

(3)夏玉米产量与氮减施水平模拟结果表明,秸秆深埋结合减施 14%~20% 氮肥,可实现夏玉米增产及降低地下水氮素污染风险的目标.

参考文献:

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783.
- [2] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [3] 魏国孝, 孙继成, 朱锋. 内蒙古河套灌区农业面源污染及防治对策[J]. 中国水土保持, 2009, (8): 27-29.
Wei G X, Sun J C, Zhu F. Agricultural area-source pollution status and prevention countermeasures of riverain irrigated regions in Inner Mongolia[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009, (8): 27-29.
- [4] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6664-6676.
Zhang Y T, Liu H B, Wang H Y, et al. A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality[J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2016, **36**(20): 6664-6676.
- [5] Ruidisch M, Bartsch S, Kettering J, *et al.* The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **169**: 21-32.
- [6] Kurothe R S, Kumar G, Singh R, *et al.* Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India [J]. Soil and Tillage Research, 2014, **140**: 126-134.
- [7] 刘宇, 章莹, 杨文亭, 等. 减量施氮与大豆间作对蔗田氮平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(3): 817-825.
Liu Y, Zhang Y, Yang W T, *et al.* Effects of reduced nitrogen application and soybean intercropping on nitrogen balance of sugarcane field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(3): 817-825.
- [8] 薛峰, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, **25**(4): 26-31, 51.
Xue F, Yan T M, Qiao J, *et al.* Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu Area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, **25**(4): 26-31, 51.
- [9] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 988-995.
Yu Y L, Xue L H, Yang L Z. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, **48**(5): 988-995.
- [10] 朱晓霞, 谭德水, 江丽华, 等. 减量施用控释氮肥对小麦产量效率及土壤硝态氮的影响[J]. 土壤通报, 2013, **44**(1): 179-183.
Zhu X X, Tan D S, Jiang L H, *et al.* Effect of reducing amount of controlled release N fertilizer on yield of winter wheat, N efficiency and soil NO_3^- -N[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(1): 179-183.
- [11] 吴得峰, 姜继韶, 孙棋棋, 等. 减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(6): 1202-1209.
Wu D F, Jiang J S, Sun Q Q, *et al.* Effect of reduced nitrogen fertilization on spring maize production and environmental impacts in rain-fed areas [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(6): 1202-1209.
- [12] 杨志谦, 王维敏. 秸秆还田后碳、氮在土壤中的积累与释放[J]. 土壤肥料, 1991, (5): 43-46.
- [13] 仵峰, 张凯, 宰松梅, 等. 小麦玉米秸秆掺土还田量对土壤水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(24): 101-105.
Wu F, Zhang K, Zai S M, *et al.* Impact of mixed straw on soil hydraulic properties[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(24): 101-105.
- [14] Cheng Y, Cai Z C, Chang S X, *et al.* Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated Black Chernozem [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, **48**(8): 941-946.
- [15] 王伟, 于兴修, 汉强, 等. 丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长长期的变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4212-4219.
Wang W, Yu X X, Han Q, *et al.* Change of soil nitrogen leaching with summer maize growing periods under plastic film mulched cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4212-4219.
- [16] Singh B, Shan Y H, Johnson-Beebout S E, *et al.* Crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia[J]. Advances in Agronomy, 2008, **98**: 117-199.
- [17] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(2): 292-302.
Li J F, Lu J W, Ren T, *et al.* Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(2): 292-302.
- [18] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1707-1716.
Chen C L, Gao M, Ni J P, *et al.* Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1707-1716.
- [19] 陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2129-2138.
Chen W L, Gao Y, Lin Y M, *et al.* Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2129-2138.
- [20] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(6): 1441-1449.
Zhao S C, Cao C Y, Li K J, *et al.* Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(6): 1441-1449.
- [21] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(12): 2336-2347.
Gai X P, Liu H B, Zhai L M, *et al.* Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(12): 2336-2347.
- [22] Ros G H, Hoffland E, Van Kessel C, *et al.* Extractable and dissolved soil organic nitrogen-A quantitative assessment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(6): 1029-1039.
- [23] Maeda M, Zhao B Z, Ozaki Y, *et al.* Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers [J]. Environmental Pollution, 2003, **121**(3): 477-487.
- [24] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 49-56.
- [25] 吴钢, 蔡井伟, 付海威, 等. 模糊综合评价在大伙房水库下游水污染风险评价中应用[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2438-2441.
Wu G, Cai J W, Fu H W, *et al.* Application of fuzzy comprehensive assessment in risk assessment of water pollution conditions in downriver area of Dahuofang reservoir [J]. Environmental Science, 2007, **28**(11): 2438-2441.
- [26] 郑文瑞, 王新代, 纪昆, 等. 非确定数学方法在水污染状况风险评价中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, **33**(1): 59-62.
Zheng W R, Wang X D, Ji K, *et al.* Application of undetermined mathematic method in risk assessment of water pollution conditions [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, **33**(1): 59-62.
- [27] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes

- [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, **75**(4): 529-538.
- [28] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, **37**(7): 1008-1017.
- Zhang W L, Wu S X, Ji H J, *et al.* Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, **37**(7): 1008-1017.
- [29] Huang T, Ju X T, Yang H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. Scientific Reports, 2017, **7**, doi: 10.1038/srep42247.
- [30] 姜涛, 李玮. 氮肥运筹对夏玉米氮素利用及土壤无机氮时空变异的影响[J]. 玉米科学, 2013, **21**(6): 101-106.
- Jiang T, Li W. Effects of nitrogen fertilization on nitrogen utilization and spatial-temporal distributions of soil inorganic nitrogen in summer Maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, **21**(6): 101-106.
- [31] 张丹, 付斌, 胡万里, 等. 秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(9): 133-140.
- Zhang D, Fu B, Hu W L, *et al.* Increasing soil nitrogen fixation capacity and crop yield of rice-rape rotation by straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(9): 133-140.
- [32] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(6): 973-981.
- [33] Heal O, Anderson J, Swift M. Plant litter quality and decomposition: An historical overview [A]. In: Caddisch G, Giller KE (Eds.). Driven by Nature. Plant Litter Quality and Decomposition[M]. Wallingford: CAB International, 1997.
- [34] 黄睿, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [35] 范富, 张庆国, 邵继承, 等. 玉米秸秆夹层改善盐碱地土壤生物性状[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(8): 133-139.
- Fan F, Zhang Q G, Tai J C, *et al.* Biological traits on corn straw interlayer in improving saline-alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(8): 133-139.
- [36] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth [J]. Soil and Tillage Research, 2002, **66**(2): 197-205.
- [37] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(4): 75-80.
- Wang Z, Feng H. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(4): 75-80.
- [38] Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amounts of water on desalinization and permeability behaviour of chloride and sulphate-dominated saline soils[J]. Agricultural Water Management, 1996, **31**(3): 225-235.
- [39] Zhou M H, Butterbach-Bahl K. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems[J]. Plant and Soil, 2014, **374**(1-2): 977-991.
- [40] 吴殿鸣, 薛建辉, 吴永波. 生态防护林减轻农田氮素面源污染的研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, **35**(6): 134-138.
- Wu D M, Xue J H, Wu Y B. Reviews on effects of ecological shelterbelts on alleviating non-point source pollution of nitrogen [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, **35**(6): 134-138.
- [41] 兰木羚, 高明. 不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4252-4259.
- Lan M L, Gao M. Influence of different straws returning with landfill on soil microbial community structure under dry and water farming[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4252-4259.
- [42] Lou Y L, Liang W J, Xu M G, *et al.* Straw coverage alleviates seasonal variability of the topsoil microbial biomass and activity [J]. CATENA, 2011, **86**(2): 117-120.
- [43] 张万锋, 杨树青, 姜帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(7): 117-124.
- Zhang W F, Yang S Q, Lou S, *et al.* Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(7): 117-124.
- [44] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(6): 272-276.
- Dai Z G, Lu J W, Li X K, *et al.* Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(6): 272-276.
- [45] Mi W H, Wu L H, Brookes P C, *et al.* Changes in soil organic carbon fractions under integrated management systems in a low-productivity paddy soil given different organic amendments and chemical fertilizers[J]. Soil and Tillage Research, 2016, **163**: 64-70.
- [46] Tosti G, Benincasa P, Farneselli M, *et al.* Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition[J]. European Journal of Agronomy, 2012, **43**: 136-146.
- [47] 杨国航, 崔彦宏, 刘树欣. 供氮时期对玉米干物质积累、分配和转移的影响[J]. 玉米科学, 2004, **12**(专刊): 104-106.
- Yang G H, Cui Y H, Liu S X. Effect of different stages of fertilizing nitrogen on accumulation, distribution and transfer of maize dry matter[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, **12**(s1): 104-106.
- [48] 汪涛, 朱波, 况福虹, 等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 781-788.
- Wang T, Zhu B, Kuang F H, *et al.* Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(4): 781-788.
- [49] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(2): 284-291.
- Zhang Z X, Liu M, Qi Z J. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in maize field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, **51**(2): 284-291.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)