ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第10期
2014年10月15日

目 次

基于虚拟撞击原理的固定源 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 采样器的研制 …… 蒋靖坤,邓建国,段雷,张强,李振,陈小彤,李兴华,郝吉明(3639)
1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素…… 郑秋萍,王宏,陈彬彬,隋平,林文(3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 … 陈晓静,祁建华,刘宁,张翔宇,申恒青,刘明旭(3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 …… 李嫣,王浙明,宋爽,徐志荣,许明珠,徐威力(3663)
烧结过程 NO_x 和 SO_2 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 …… 任重培,朱天乐,朱廷钰,吕栋(3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 …… 宋磊,张彬,邓文(3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 …… 苏永中,杨晓,杨荣(3683)
海河流域河流生态系统健康评价 …… 郝利霞,孙然好,陈利顶(3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 …… 刘树元,郑晨,袁琪,王先兵,王秫炎(3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 …… 包静玥,鲍建国,李立青(3709)
岩溶地下河水文地球化学对降雨的响应:以重庆雪玉洞地下河系统为例 …… 王凤康,梁作兵,于正良,江泽丽(3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 … 蓝家程,孙玉川,田萍,卢丙清,师阳,徐昕,梁作兵,杨平恒(3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的污染特征与生态风险 ……
…… 陈宣宇,薛南冬,张石磊,李发生,龚道新,刘博,孟磊(3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 …… 王瑞霖,程先,孙然好(3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 …… 杨福霞,简慧敏,田琳,姚庆祯(3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究…… 邵田田,赵莹,宋开山,杜嘉,丁智(3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 …… 刘丹丹,李正魁,叶忠香,张万广(3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 …… 陈娇,白晓慧,卢宁,王先云,章永辉,吴潘成,郭心驰(3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 …… 白静,赵勇胜,孙超,秦传玉,于凌(3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中Pb(Ⅱ)的性能 …… 万顺利,薛瑶,马钊钊,刘国斌,余艳霞,马明海(3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 …… 王文东,王亚博,范庆海,丁真真,王文,宋珊,张银婷(3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 …… 彭娜,王开峰,刘国光,曾令泽,姚锟,吕文英(3794)
二氧化钛(P25)光催化降解二苯砷酸的研究 …… 王阿楠,滕应,骆永明(3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 …… 谭冲,刘颖杰,王薇,邱珊,马放(3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 …… 佟娟,王元月,魏源送(3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 …… 韦燕莉,鲍恋君,巫承洲,曾永平(3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 …… 杜宝玉,王琼,罗遥,段雷(3830)
应用X射线吸收近边结构谱研究东北农耕土壤中的氯种态及含量……
…… 李晶,郎春燕,马玲玲,徐殿斗,郑雷,路雨楠,崔丽瑞,张晓萌(3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 …… 李俊超,党廷辉,郭胜利,薛江,唐骏(3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 …… 唐冰培,杨世杰,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集(3851)
外生菌根真菌对 Al^{3+} 胁迫和低钾土壤的响应…… 张薇,黄建国,袁玲,李阳波,何林卫(3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 …… 黄福义,李虎,韦蓓,欧阳纬莹,苏建强(3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 …… 左继超,高婷婷,苏小娟,万田英,胡红青(3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 …… 郑家传,张建荣,刘希雯,许倩,施维林(3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 …… 李鹏,廖晓勇,阎秀兰,崔骁勇,马栋(3888)
O_3 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 …… 杨田田,张巍巍,胡恩柱,王效科,田媛,冯兆忠(3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响 …… 李睿达,张凯,苏丹,逯非,万五星,王效科,郑华(3903)
$^{13}CO_2$ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 …… 陈展,王效科,尚鹤(3911)
表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解…… 陈少毅,张静,汪涵,任源(3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 …… 信欣,姚力,鲁磊,冷璐,周迎芹,郭俊元(3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 …… 吴松,肖勇,郑志勇,郑越,杨朝晖,赵峰(3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 …… 王敏,赵阳国,卢珊珊(3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测:基于生物配体模型 …… 王万宾,陈莎,吴敏,赵婧(3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 …… 马秀娟,沈建忠,王腾,王海生,黄丹,孙广文,龚成(3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究 …… 张铃松,王业耀,孟凡生,周岳溪,于海斌(3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 …… 李鹏,杨从巧,金军,王英,刘伟志,丁问微(3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 …… 牟真,麻春艳,程杰,李进军(3977)
$CuO(-CeO_2)/Al_2O_3$ 催化剂对萘催化氧化性能研究 …… 查键,周宏仓,何都良,单龙,张露,谢婕(3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用 …… 徐建英,赵春桃,魏东斌(3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 …… 周羽化,卢延娜,张虞,朱静,雷晶,申晨,武雪芳(3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估 …… 范育鹏,陈卫平(4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 …… 王琳,吕永龙,贺桂珍,王铁宇(4009)
环境损害评估:构建中国制度框架 …… 张红振,王金南,牛坤玉,董璟琦,曹东,张天柱,骆永明(4015)
《环境科学》征稿简则(3887) 《环境科学》征订启事(4008) 信息(3730,3739,3774,3895)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响

苏永中,杨晓,杨荣
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站,中国科学院内陆河流域生态-水文重点实验室,兰州 730000)

摘要: 在灌溉农田生态系统,土壤剖面中硝态氮(NO_3^--N)的积累、分布、运移及地下水氮污染不仅受灌溉、施肥的影响,也与土壤质地有密切联系. 本研究在黑河流域中游临泽平川绿洲设置了黑河河漫滩-老绿洲农田-新垦绿洲农田-绿洲外围固沙带一个监测断面 10 个观测井,对地下水NO_3^--N含量进行连续监测,并对不同景观单元非饱和带土壤质地和NO_3^--N含量进行了分析,对不同质地土壤NO_3^--N在剖面的运移变化和氮淋溶损失进行监测. 结果表明老绿洲农田, 0 ~ 300 cm 土层土壤质地的垂向分布为上层砂壤土,下层为壤土和黏壤土; 而新垦沙地农田在土壤剖面中也有洪积黏土层出现,但 0 ~ 300 cm 不同土层砂粒含量均在 80% 以上; 绿洲外围固沙带土壤在 160 cm 以下出现黏土层分布; 土壤NO_3^--N含量与黏粉粒含量呈显著相关,显著程度固沙带 > 新垦绿洲农田 > 老绿洲农田. 土壤黏粉粒含量显著影响氮的淋溶. 老绿洲农田区域,地下水NO_3^--N含量变动在 1.01 ~ 5.17 mg·L^{-1},平均 2.65 mg·L^{-1}; 新垦沙地农田区域地下水NO_3^--N含量变动在 6.6 ~ 29.5 mg·L^{-1},平均 20.8 mg·L^{-1},2013 年 5 ~ 10 月平均含量为 26.5 mg·L^{-1},较 2012 年同期平均值上升了 9.5 mg·L^{-1}; 绿洲外围固沙带地下水NO_3^--N含量呈明显的增加趋势. 地下水浅埋区非饱和带土壤质地是土壤NO_3^--N淋溶损失和地下水NO_3^--N污染的关键控制因子. 边缘绿洲新垦沙地农田是地下水氮污染的脆弱带和高风险区域,实施有效降低地下水氮污染的种植模式及施肥和灌溉管理是区域生态农业需考虑的问题.

关键词:土壤质地; 土壤硝态氮积累; 氮淋溶; 地下水氮污染; 荒漠绿洲
中图分类号: X523 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)10-3683-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.10.007

Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin

SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong
(Key Laboratory of Eco-Hydrology in Inland River Basin, Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In irrigated agricultural ecosystems, the accumulation, distribution and transfer of nitrate nitrogen (NO_3^--N) in soil profile and groundwater nitrate pollution were influenced by irrigation and fertilization, and were closely related to soil textural characteristics. In this study, a monitoring section with 10 groundwater observation wells along Heihe River flood land-old oasis croplands-newly cultivated sandy croplands-fixed sandy land outside oasis was established in Pingchuan desert-oasis in Linze county in the middle of Heihe river basin, and groundwater NO_3^--N concentration was continuously monitored. Soil texture and NO_3^--N concentration in the unsaturated zone at different landscape locations were determined. The NO_3^--N transfer change in soil profile, nitrate leaching of soils with different texture and fertility levels in the 0-100 cm layer were analyzed. The results indicated that the vertical distribution of soil texture was sandy loam in the 0-130 cm depth, loam in the 130-190 cm and clay loam in the 190-300 cm for the old oasis croplands. For newly cultivated sandy croplands, sand content was more than 80% in each soil layer of the 0-300 cm profile, although a thin clay layer occurred in the 140-160 cm depth. The clay layer occurred 160 cm below the sand-fixing zone outside oasis. There were significant correlations between soil NO_3^--N concentration and silt + clay content, and the order of significant degree was the natural soils of sandy lands > the newly cultivated sandy croplands > the old oasis croplands. The loss of N leaching was closely correlated to the silt + caly content in the 0-100 cm soil depth. The groundwater NO_3^--N concentration varied from 1.01 to 5.17 mg·L^{-1}, with a mean value of 2.65 mg·L^{-1} and from 6.6 to 29.5 mg·L^{-1}, with an average of 20.8 mg·L^{-1} in the area of old oasis croplands and the newly cultivated croplands, respectively. The averaged groundwater NO_3^--N concentration in the area of newly cultivated sandy croplands during the period of May and October, 2013 was 26.5 mg·L^{-1}, which was increased by 9.5 mg·L^{-1} in comparison with the

收稿日期: 2014-03-18; **修订日期**: 2014-05-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(91125022, 41201284); 中国科学院重点部署项目(KSZD-EW-Z-022-01)
作者简介: 苏永中(1966 ~),男,博士,研究员,主要研究方向为干旱区土壤学与绿洲农业生态学,E-mail: suyzh@lzb.ac.cn

same period of 2012. There was a clear increasing trend in groundwater NO_3^--N concentration in the sand-fixing zone outside oasis. The textural characteristics of soil unsaturated zone in the shallow groundwater distribution area was the key determining factor for controlling soil NO_3^--N leaching and groundwater nitrate pollution. The newly cultivated sandy croplands were the nitrate vulnerable zones and high-risk areas of groundwater nitrate pollution. The implementation of cultivation pattern and irrigation and fertilization management that could effectively reduce groundwater NO_3^--N pollution should be considered in the development of ecological agriculture.

Key words: soil texture; soil NO_3^--N accumulation; N leaching; groundwater NO_3^--N pollution; desert-oasis

地下水的硝态氮污染恶化区域饮用水源、影响人类健康、导致河流和湖泊的富营养化,成为近几十年来广泛关注的环境问题[1]. 在农田区域,地下水氮污染的主要原因在于化学氮肥的过量施用,从20 世纪 80 年代以来,已被不同地域的大量研究所证实[1~5]. 为此,欧美一些国家早在 20 世纪 80 ~90 年代就已采取了积极的调控措施,研究降低硝态氮淋溶损失的农业管理措施[6]和控制地下水硝态氮污染的施肥标准[7],划定“硝酸盐敏感区”(nitrate sensitive areas, NSA)和“硝酸盐脆弱区”(nitrate vulnerable zones, NVZs),立法限定氮的施用量[8]. 中国自 20 世纪 80 年代以来化肥用量持续增长,由此引起的地下水硝态氮污染问题日益凸现[4]. Gu 等[5]对近 10 年来已发表的地下水氮污染的文献进行总结,结果表明,在过去的近 30 年中,渗漏到地下水中的活性氮从 1980 年的 2.0 $Tg\cdot a^{-1}$增加到了 2008 年的 5.0 $Tg\cdot a^{-1}$,增加了约 1.5 倍,从农田系统渗漏的硝态氮为其主要的污染源; 对全国 628 个地下水硝态含量的数据统计,28% 的水样硝态氮(以 N 计)含量超过中国饮用水标准(20 $mg\cdot L^{-1}$,GB 5749-85).

地下水的硝态氮污染主要通过氮的淋溶和渗漏,而土壤质地决定着土壤水分入渗、非饱和导水率和持水性能[9]. 因此,除施肥、灌溉、降雨等因素外,非饱和带土壤质地特征也是影响硝态氮淋溶损失的关键,并对地下水氮污染起重要的调节作用[10]. 河流的洪积-冲积区域,一方面地下水位较高,另一方面洪积沉积物质渗漏的高异质性和砾石在剖面中的分布,是氮淋溶和地下水氮污染的高风险区和欧盟国家划定的“硝酸盐脆弱区”的重点区域[11]; 沙质土壤区域进行灌溉农业生产会导致区域地下水严重的硝态氮污染,如美国中南部的 Wisconsin 中部沙地平原,灌溉农业的发展伴随着严重的地下水氮污染,种植甜玉米后,运移到地下水的硝态氮达到 126 ~ 169 $kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$,77% 的肥料氮进入地下水,成为美国中部氮输出最高的区域[1]. 近年来国内对地下水硝态氮污染的研究主要集中在地下水氮污染现状、区域分布及其影响因素等方面[4, 5, 12~15]. 但有关非饱和带土壤状况对地下水氮污染调节作用的影响关注较少. 在地下水位分布较浅的区域,对土壤非饱和带物理性状的研究对认识区域土壤水分运移、氮淋溶特征、地下水氮负荷量有重要作用,同时对硝态氮淋溶损失的敏感区域确定,进而进行减少氮淋溶损失的灌溉、施肥管理有重要的指导作用[11].

甘肃河西走廊中段黑河流域张掖绿洲灌溉农业区是国内单季作物产量最高的区域之一,也是国内粮食生产化肥用量较大的区域[16]. 20 世纪 90 年代推广的小麦玉米带田,在保证充分灌溉和施用有机肥的基础上,化肥 N 的投入在 450 ~ 750 $kg\cdot hm^{-2}$[17]. 近十几年来,黑河中游绿洲主要种植制种玉米,区域平均化肥氮的投入已超过 350 $kg\cdot hm^{-2}$[16],灌溉方式仍以大水漫灌为主. 区域土壤成土母质为洪积-冲积物,特别是近几十年来的新垦绿洲区,荒漠土壤转变为灌溉农田后,粗质地、结构松散和有机质含量极低的土壤特性决定了农作物生产主要依赖大量的化肥投入与高额的灌溉量,地下水氮淋溶损失严重,存在地下水氮污染的高风险[16,18]. 本研究通过对荒漠绿洲过渡带不同景观单元地下水硝态氮监测,了解区域地下水氮污染动态; 并通过了解土壤剖面质地特征及土壤硝态氮积累,认识非饱和带土壤特征对氮淋溶和地下水氮污染的影响,以期为制定减少氮淋溶损失的区域合理灌溉和施肥决策提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为甘肃河西走廊中段临泽北部平川绿洲,有农田面积 52.67 km^2,除黑河沿岸的老绿洲农田外,近一半农田为近 50 年来不断向荒漠扩展的结果,绿洲外围北部为砾质荒漠,东北部为沙漠,在新垦绿洲与沙漠之间营造条带状乔木林和梭梭灌木林,形成人工固沙带. 研究区域多年平均降水量为 116.8 mm,年蒸发量2 390 mm,年均气温 7.6℃,无霜期 165 d,农田区域地下水位在 3 ~6 m. 2000 年开始,黑河向下游额济纳实施分水以来,平川绿洲由长期的黑河水灌溉,转变为地表水与地下水联合灌

溉，2007 年全灌区地下水灌溉井已达 343 眼[19]，地下水灌溉量逐年扩大. 土壤类型黑河沿岸分布有小面积的绿洲潮土和灌淤土，大部分农田土壤为自然荒漠土壤(灰棕漠土和风砂土)开垦后形成的灌漠土，由于开垦年限不同，土壤熟化程度各异，近几十年来新垦农田土壤仍呈现荒漠土壤的特征，且在空间上存在明显的异质性分布. 近年来，该区域主要种植制种玉米，占种植面积的 90% 以上，玉米种植方式为地膜覆盖栽培、漫灌，传统耕作方式. 玉米生产主要依赖于大量的化肥投入，化肥施用量在 300 ~ 450 kg·hm^{-2}(以 N 计)和 150 ~ 225 kg·hm^{-2}(以 P_2O_5 计). 地下水也是研究区域人畜饮用水源.

1.2　研究方法

(1)地下水位观测井布设、取样　沿黑河河岸-老绿洲农田区-新垦绿洲农田区-绿洲外围固沙带的一个断面布设了 10 个浅层地下水位及水质观测井，其中黑河河漫滩 1 个(1 号)、老绿洲农田区(2 ~ 4 号)、新垦绿洲农田区(5 ~ 7 号)和固沙带(8 ~ 10 号)分别布设 3 个观测井(图 1). 观测井的间隔距离在 500 ~ 1 000 m. 2012 年 4 月 ~ 2013 年 10 月在每月的 1 日、11 日和 21 日测定地下水位，每月 11 日取水样测定硝态氮含量.

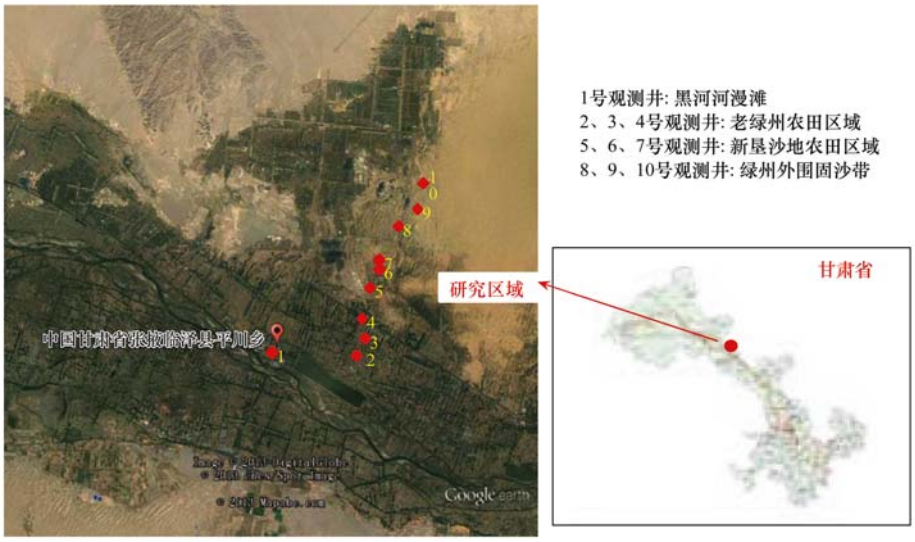

图 1　研究区域及地下水观测井位置示意

Fig. 1　Study area and location sketch map of groundwater observation wells

(2)土壤剖面取样　2013 年 9 月在位于绿洲农田和绿洲外围固沙带的 9 个观测井所在地块用土钻取 0 ~ 300 cm 的剖面样，取样层次为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100、100 ~ 120、120 ~ 150、150 ~ 180、180 ~ 210、240 ~ 270 和 270 ~ 300 cm. 所取部分鲜样装入自封袋，在实验室进行硝态氮的测定，部分样风干后进行粒级分析. 不同景观带观测井及所在地块的土地利用与管理如表 1.

表 1　观测井所在地块土地利用状况

Table 1　Distribution area of observation wells and land use

地下水观测井	观测井所在区域	土地利用和管理
1 号	黑河河漫滩	黑河河漫滩柽柳林地，地下水位波动在 0.8 ~ 1.1 m
2 ~ 4 号	老绿洲农田	为黑河一级台地，土壤为灌漠土，连续多年种植制种玉米，生育期灌溉 5 ~ 6 次，灌溉量 6 000 ~ 7 200 m^3·hm^{-2}，施农肥，施用化肥 N 量 300 ~ 350 kg·hm^{-2}；地下水位波动在 3.8 ~ 5.0 m
5 ~ 7 号	新垦沙地农田	为近 40 年来新垦沙地农田，土壤为灌耕风沙土，5 号观测井所在地块种植制种玉米，6 ~ 7 号井所在地块种植大田玉米，玉米生育期灌溉次数 8 ~ 9 次，灌溉量为9 600 ~ 12 000 m^3·hm^{-2}，不施农肥，施 N 量 375 ~ 450 kg·hm^{-2}；地下水位波动在 3.2 ~ 4.8 m
8 ~ 10 号	绿洲外围固沙带	绿洲农田边缘固定沙地、种植人工固沙梭梭林、无灌溉，地下水位波动在 3.8 ~ 4.5 m

(3)不同土壤质地与肥力水平农田土壤硝态氮动态观测　2012 年，在中国生态系统研究网络临泽站灌溉试验观测场进行动态取样，观测场小区土壤为 5 个站区周边不同时期开垦的农田土壤分层填埋形成，0 ~ 100 cm 不同土层土壤粒级分布、容重、有机质及全氮含量如表 2，表层土壤质地 S1 和 S2 为砂土、S3 为壤砂土、S4 和 S5 为砂壤土；不同小区 100 cm 以下土层土壤一致，除 140

~160 cm 出现一薄层黏土淤积层,砂粒含量达79%,其余土层砂粒含量在90%以上,180 cm 以下土层以1~2 mm 的粗砂为主[16]. 每种土壤处理由9个5 m×4 m 的小区组成. 2012 年进行了玉米灌溉田间试验,化肥用量均为 N:300 kg·hm^{-2},P_2O_5:150 kg·hm^{-2},所用化肥为尿素和磷酸二铵,磷肥和1/3 氮肥在播种时基施,另2/3 氮肥分别在玉米拔节期和灌浆期追施. 本研究对充分灌溉下的每种土壤3个小区进行土壤剖面硝态氮含量进行动态监测,分别在2012 年4月20日(播种前)、6月24日(拔节期)、7月30日(孕穗期)和9月24日(收获后)取样,取样层次为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~200 cm. 5种土壤在玉米生育期的灌溉量分别为9 600 m^3·hm^{-2}(S1,S2)、8 400 m^3·hm^{-2}(S3)、7 200 m^3·hm^{-2}(S4)、6 000 m^3·hm^{-2}(S5)(土壤持水性能不同,所需的灌溉次数和灌溉量不同).

表2 5个监测土壤的物理化学性状

Table 2 Physical and chemical properties of the 5 soils

土壤	土层 /cm	沙粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%	容重 /g·cm^{-3}	有机质 /g·kg^{-1}	全氮 /g·kg^{-1}	pH
S1	0~20	83.1	7.4	9.6	1.60	5.03	0.38	8.9
	20~40	87.3	5.2	7.4	1.55	3.54	0.23	9.1
	40~60	89.8	3.8	6.4	1.55	2.43	0.14	9.0
	60~80	91.3	2.8	5.8	1.60	2.02	0.12	9.1
	80~100	91.7	2.6	5.7	1.62	1.78	0.12	9.1
S2	0~20	80.1	8.9	11.0	1.49	5.90	0.33	8.9
	20~40	90.6	5.1	4.3	1.53	3.83	0.21	9.1
	40~60	91.6	2.4	6.0	1.58	1.78	0.20	9.1
	60~80	92.5	1.9	5.6	1.63	1.74	0.10	9.2
	80~100	92.0	2.2	5.8	1.62	1.66	0.10	9.2
S3	0~20	65.5	18.2	16.3	1.49	7.62	0.50	8.6
	20~40	76.7	11.5	11.8	1.55	5.74	0.40	8.7
	40~60	87.6	4.9	7.5	1.55	3.34	0.08	8.9
	60~80	91.8	2.3	5.8	1.56	2.32	0.10	9.0
	80~100	92.3	2.1	5.6	1.56	1.80	0.08	9.1
S4	0~20	57.8	24.4	17.8	1.39	9.99	0.76	8.5
	20~40	55.4	26.3	18.3	1.44	8.18	0.59	8.6
	40~60	72.0	14.7	13.3	1.45	7.12	0.43	8.8
	60~80	85.1	5.5	9.4	1.55	3.21	0.20	9.0
	80~100	90.8	2.6	6.7	1.56	2.82	0.14	9.0
S5	0~20	54.1	27.7	18.2	1.39	11.49	0.85	8.5
	20~40	50.6	27.7	21.7	1.44	8.87	0.65	8.5
	40~60	55.1	26.7	18.2	1.49	7.48	0.59	8.5
	60~80	76.5	11.5	12.0	1.55	6.52	0.30	8.8
	80~100	90.3	3.0	6.7	1.56	2.56	0.15	9.0

(4)土壤样品及水样的分析 所取土壤样品和水样运回实验室,土样一部分鲜样保存在4℃的冰箱中用于硝态氮的测定,一部分风干后,用湿筛加吸管法测定土壤粒级组成. 水样NO_3^--N含量用离子色谱测定;土壤NO_3^--N 含量用2 mol·L^{-1} KCl 浸提,滤液在220 nm 和275 nm 下比色测定[20];

(5)数据分析 土壤NO_3^--N积累量(kg·hm^{-2})=土层厚度(cm)×土壤容重(g·cm^{-3})×土壤NO_3^--N含量(mg·kg^{-1})/10;用 SPSS 软件进行各样地与处理之间的显著性差异、土壤性状之间的回归分析.

2 结果与分析

2.1 荒漠绿洲不同景观带土壤剖面粒级组成与硝态氮含量特征

黑河沿岸老绿洲农田至绿洲外围固沙带不同景观单元土壤粒级组成在剖面的分布有明显的分异. 老绿洲农田(Ⅰ)130 cm 层次以上砂粒含量在54.5%~63.0%,为壤砂土,130 cm 以下黏粉粒含量逐渐增加,190 cm 以下出现黏土层,为壤土和黏壤土;新垦沙地农田(Ⅱ)0~300 cm 土壤砂粒含量均在80%以上,整个剖面质地为砂土;绿洲外

围固沙带(Ⅲ)130 cm 以下砂粒含量逐渐减少,在 220 cm 以下出现黏土层分布(表 3). 土壤剖面中 NO_3^--N含量同一土层老绿洲农田显著高于新垦沙地农田和固定沙地. 剖面分布特征显示,老绿洲农田在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm NO_3^--N 含量较高,随后出现下降,在 190 ~ 300 cm 土层有明显的积累;新垦沙地农田在 0 ~ 20 cm 较高、20 ~ 300 cm 土层有一个均匀分布;而绿洲外围固沙带固定沙地表层土壤NO_3^--N极低,随土层深度的增加而增加,在 130 cm 以下各土层NO_3^--N 含量高于新垦沙地农田(表 3).

土壤剖面中NO_3^--N含量与土壤黏粉粒含量有显著的线性相关(图 2),表明土壤黏粉粒对NO_3^--N的保持作用.

表 3　荒漠绿洲不同景观带土壤剖面粒级组成与硝态氮含量[1)] (n = 3)

Table 3　Soil particle size distribution and NO_3^--N content in different landscapes in the desert-oasis region (n = 3)

土层 /cm	砂粒含量/%			黏粉粒含量/%			硝态氮含量/mg·kg^{-1}		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
0 ~ 20	56.5	86.5	93.2	40.9	13.5	6.8	12.34 a	6.39 b	0.51 c
20 ~ 40	53.9	90.5	91.3	46.1	9.5	8.7	10.08 a	2.77 b	0.65 c
40 ~ 60	58.9	94.5	91.3	41.1	5.5	8.7	7.08 a	1.66 b	1.07 c
60 ~ 80	63.0	94.1	88.7	40.3	5.9	11.3	5.93 a	1.62 b	0.94 c
80 ~ 100	61.8	94.9	91.9	38.2	5.1	8.1	5.17 a	1.38 b	1.76 b
100 ~ 130	54.5	95.4	90.9	45.5	4.6	9.1	4.82 a	1.47 b	2.11 b
130 ~ 160	41.2	92.2	76.6	55.5	7.8	23.4	7.02 a	1.91c	3.84b
160 ~ 190	38.3	85.2	66.1	61.7	14.8	33.9	8.80 a	3.05 c	4.26 b
190 ~ 220	21.6	82.9	49.5	78.4	7.8	50.5	9.35 a	1.34 c	6.08 b
220 ~ 250	24.2	89.5	43.6	75.8	7.2	56.4	12.45 a	2.73 c	8.09 b
250 ~ 280	17.1	91.8	41.1	82.9	8.2	58.9	14.74 a	1.21c	9.43 b
280 ~ 300	19.8	94.3	26.5	80.2	5.7	73.5	16.31 a	1.19 c	9.27 b

1) Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 分别为老绿洲农田、新垦绿洲农田和绿洲外围固沙带;表中不同字母表示不同景观单元同一土层硝态含量差异显著(P < 0.05)

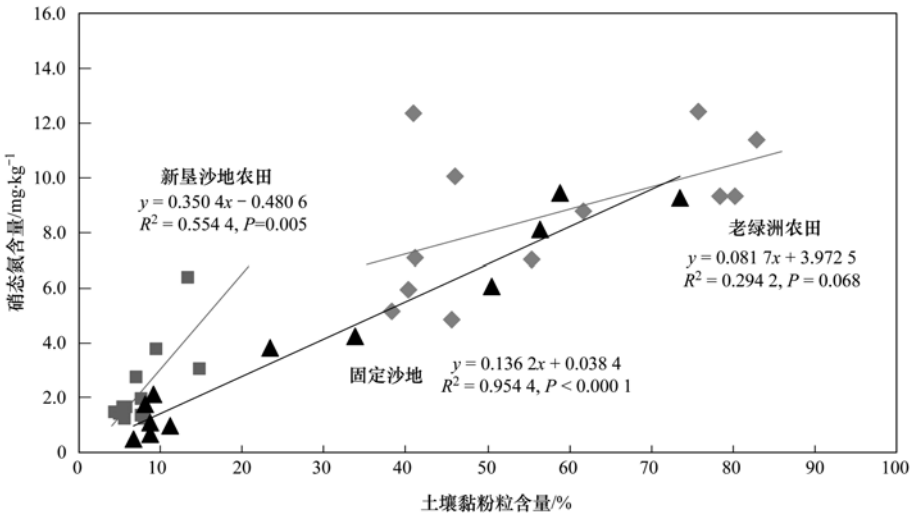

图 2　土壤黏粉粒含量与硝态氮含量的关系

Fig. 2　Relationships between soil silt + clay content and NO_3^--N concentration

2.2　新垦荒漠绿洲不同土壤质地与肥力水平农田土壤硝态氮积累与运移

0 ~ 100 cm 土层土壤质地、有机质及全氮含量明显不同的 5 种土壤, NO_3^--N含量在土壤剖面不同土层具明显的差异,在 2012 年玉米播种前(4 月 20 日)测定,0 ~ 20 cm 耕层土壤NO_3^--N含量变动在 5.3 mg·kg^{-1}(砂土,S1) ~ 22.6 mg·kg^{-1}(砂壤土,S5),随土壤剖面深度的增加,NO_3^--N含量下降(图 3);在种植玉米施用相同的化肥用量,在玉米拔节期施肥和灌溉后测定(6 月 24 日),砂壤土(S4、S5)、0 ~ 60 cm 土层NO_3^--N含量明显增加,而壤砂土(S3)和砂土(S1、S2)并无明显变化,在孕穗期第二次追肥后测定(7 月 30 日),NO_3^--N含量与播种前比较并无明显变化,收获后测定(9 月 24 日),不同土壤 80 cm 以上土

层较播种前均有不同程度的下降.

0 ~ 100 cm 玉米根系分布区土壤NO_3^--N的积累量,播种前变动在 54.7 kg·hm^{-2}(砂土,S1) ~ 171.2 kg·hm^{-2}(砂壤土,S5),在第一次追肥后玉米根区NO_3^--N的积累量达到最大,但在孕穗期第二次追肥和灌溉后 5 d 测定,NO_3^--N的积累量降低至播前水平以下,收获后测定,0 ~ 100 cm 的积累量降低至最低值,变动在 27.2 kg·hm^{-2}(砂土,S1) ~ 119.0 kg·hm^{-2}(砂壤土,S5). 与播种前比较,0 ~ 100 cm 土壤NO_3^--N的积累量 5 种土壤分别下降了 50.4%(S1)、27.6%(S2)、31.9%(S4)、9.3%(S4)和 23.2%(S5). 收获后 100 ~ 200 cm 土层中NO_3^--N的积累量较播前增加了 5.6 kg·hm^{-2}(砂土,S1) ~ 17.2 kg·hm^{-2}(砂壤土,S5)(图 4).

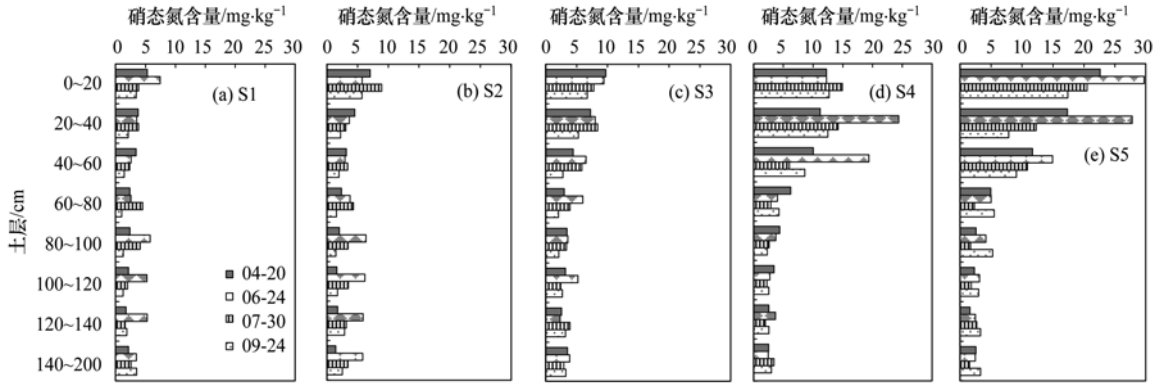

图 3 5 种土壤种植玉米不同时期土壤剖面硝态氮含量分布

Fig. 3 Distribution of NO_3^--N concentration in different layers of 5 soils in different periods

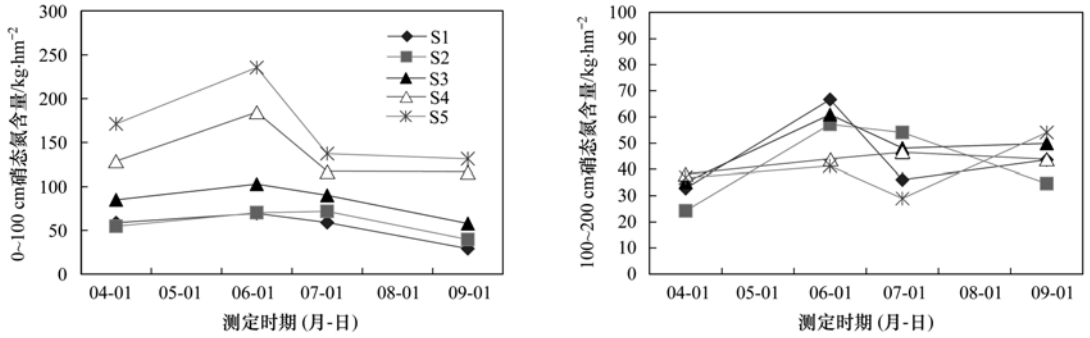

图 4 土壤剖面(0 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm 土层)硝态氮储量变化

Fig. 4 Temporal variation in NO_3^--N stock in the 0-100 cm and 100-200 cm depth of different soils

2.3 荒漠绿洲不同景观带地下水硝态氮含量动态变化

从 2012 年 5 月 ~ 2013 年 10 月,连续 18 个月对位于黑河河漫滩至绿洲边缘固沙带的 10 个观测井浅层地下水进行取样监测. 结果表明,黑河河漫滩、老绿洲农田区域地下水NO_3^--N含量 18 个月的平均值分别为 2.76 mg·L^{-1}和 2.65 mg·L^{-1},分别变动在 1.81 ~ 4.13 mg·L^{-1}、1.01 ~ 5.17 mg·L^{-1},波动范围较小,地下水未受硝态氮的污染; 新垦沙地农田区域 3 个观测井平均值为 21.2 mg·L^{-1},变动范围在 14.4 ~ 29.5 mg·L^{-1},2012 年 11 月用黑河水冬灌后NO_3^--N含量出现低值,随后在 12 月 11 日取样测定,已恢复至 10 月的水平,此后出现逐渐上升. 从连续 18 个月的监测,新垦沙地农田区域浅层地下水NO_3^--N污染程度呈明显的增加趋势,2013 年呈加速的趋势,2013 年 5 ~ 10 月的NO_3^--N含量平均值为 26.5 mg·L^{-1},较 2012 年 5 ~ 10 月的平均值增加了 9.5 mg·L^{-1}. 荒漠绿洲边缘固沙带地下水NO_3^--N含量变动在 2.5 ~ 13.3 mg·L^{-1}. 2013 年呈现加速上升的趋势(图 5).

3 讨论

本研究的结果表明,灌溉农田在耕作层(0 ~ 20 cm)和犁底层(20 ~ 40 cm)有相对较高的硝态氮积累,而绿洲外围固沙带的自然沙地土壤,其较高的硝态氮含量出现在有黏土层分布的 190 cm 以下的土

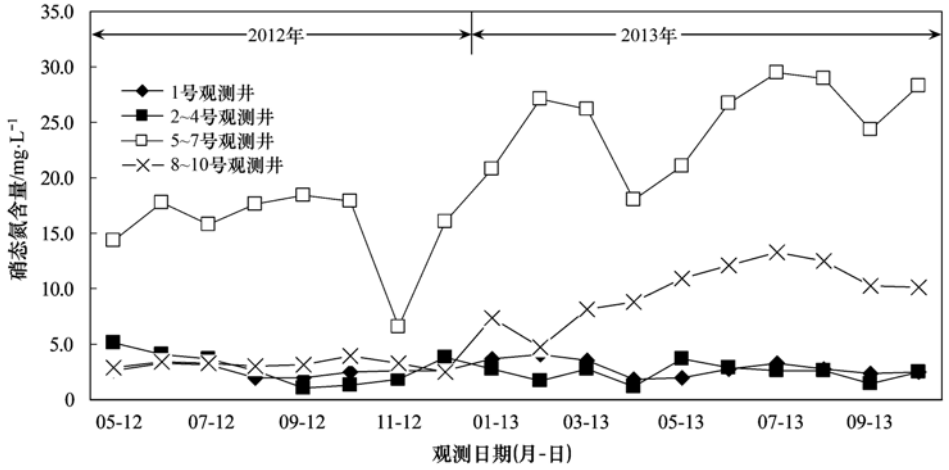

图 5　荒漠绿洲不同景观带浅层地下水硝态氮动态

Fig. 5　Variation in NO_3^--N concentration in the different landscapes in a desert-oasis region

层(表 3). 回归分析结果表明,绿洲外围固沙带自然土壤,黏粉粒含量可以解释土壤剖面中NO_3^--N含量的 95.4% 的变异(图 2);对于灌溉农田,土壤硝态氮在剖面中的积累除受土壤质地的影响外,也受灌溉、施肥和农作物氮素吸收利用等多个因素的影响[21];另外在根系主要分布层,土壤有机质含量、土壤团聚体的形成与稳定性也影响到氮的保持和淋溶、以及氮的矿化与反硝化过程等. 新垦沙地农田,土壤结构尚未发育,有机质含量低,土壤黏粉粒含量可以解释 55.4% 的土壤硝态氮含量的变异;而老绿洲农田土壤发育程度较好,土壤有机质含量相对较高,在长期的耕作过程中,在耕作层已形成较稳定的土壤结构[22],在根系分布层,特别是耕作层,NO_3^--N的积累和吸持不仅受黏粉粒的影响,也受土壤团聚体及有机质含量的影响,因此,老绿洲农田土壤黏粉含量与NO_3^--N含量的相关性相对较低(R^2 = 0.294, P = 0.068).

在灌溉农业区,硝态 N 向地下水的运移量,取决于施 N 量、作物的 N 吸收量及淋溶量[23]. 玉米根系主要分布在 0 ~ 100 cm 的土层,淋溶到 100 cm 土层以下的硝态 N 不能被作物吸收利用. 本研究的结果表明,在施 N 量相同的条件下,在播种前、玉米生育期和收获后,0 ~ 100 cm 土层,特别是 0 ~ 40 cm 土层NO_3^--N的含量及积累量均表现为随土壤黏粉粒含量的增加而增加. 不同质地土壤玉米产量和吸 N 量存在显著差异[玉米吸 N 量变动在砂土(192.6 ± 15.0) kg·hm^{-2} (砂土 S1) ~ 331.1 ± 21.9 kg·hm^{-2} (砂壤土 S5),数据未列出],表明砂土较砂壤土有显著高的化肥 N 通过淋溶损失而未被作物吸收利用. 土壤粒级组成决定着土壤持水性能和水分养分运移[9]、影响氮的淋溶过程[24];黏粉粒含量高的土壤有相对较好的养分保持能力,在一定程度上可以阻止硝态氮的向下淋溶[25],而排水性好、持水能力弱的砂质土壤NO_3^--N更容易随水迁移而流失[26,27]. Simmelsgaard [24] 在丹麦的一项研究表明,在平均施 N 量为 168 kg·(hm^2·a)$^{-1}$、0 ~ 25 cm 土层黏粒含量在 5%、12% 和 20% 时,N 的淋溶损失量分别为 68、44 和 26 kg·(hm^2·a)$^{-1}$. 与此研究结果相一致,本研究的结果表明,随着土壤黏粉粒含量的增加,作物 N 的吸收量增加、NO_3^--N在根系分布层的保持量增加、N 的淋溶损失量减小. 对于边缘绿洲新垦沙地农田,土壤砂粒含量在 85% 以上,加之作物生产中的高水、肥投入,是 N 淋溶损失,导致地下水NO_3^--N浓度升向的主要原因.

本研究结果也表明,在地下水浅埋区域,非饱和带土壤性状、特别是质地特征对地下水氮污染起着极其重要的作用. 对不同景观带 0 ~ 300 cm 不同土层土壤粒级组成分析表明,老绿洲农田土壤质地层次有明显的垂向变异,0 ~ 130 cm 土壤为粉沙壤土,长期的耕作培肥,土壤熟化程度高,结构稳定性好[22],而在 130 cm 以下开始出现洪积黏土层,土壤质地由砂壤土向壤土(130 ~ 190 cm)和黏壤土(190 ~ 300 cm)转变,这种土体构型使黏土层以上形成滞水层,有利于根系分布层作物对养分的利用,并阻止土壤水分和溶质向下层的渗漏迁移,这是老绿洲农田区域地下水NO_3^--N含量低的主要原因;另外老绿洲农田为黑河一级台地,黑河水与绿洲农田区域地下水之间的平流交换产生的稀释效应也许是老绿

洲农田区域地下水NO_3^--N含量低的另一个原因. 而在新垦沙地农田区域,土壤剖面中不同土层质地没有明显分异,除在 170 cm 处出现一薄层黏土层外,其余土层均为砂土质地,这种土体构型成为氮淋溶损失和地下水氮污染的极敏感区域; 在这一敏感区域,人为的灌溉、施肥、耕作等农业管理对地下水NO_3^--N含量有着强烈的影响,如 2012 年 11 月监测,新垦沙地区域在进行地表水冬灌后,地下水位由 4.8 m 上升到了 2.9 m,由于地表水的稀释作用,地下水NO_3^--N含量降至最低值,但这种稀释作用只维持很短的时间,说明新垦沙地区域地下水已受到NO_3^--N的严重污染. 另一方面,新垦绿洲区域,作物生育期主要依赖于地下水灌溉,每一次灌溉,部分灌溉用水又渗漏回归地下水,每年地下水的多次循环利用会进一步加剧NO_3^--N的污染[10]. 绿洲外围固沙带地下水NO_3^--N含量 2013 年后有持续增加的趋势,这可能与地下水从新垦边缘绿洲向绿洲外围的水平流动有关,绿洲外围荒漠区地下水NO_3^--N含量的增加,是否对荒漠植物的养分利用和营养平衡及生物化学循环产生影响,需持续深入的观测研究.

4 结论

硝态氮在土壤剖面中的分布和积累、氮的淋溶损失与土壤剖面粒级组成密切相关. 黑河流域中游边缘绿洲地下水浅埋区不同景观带土壤剖面特征呈高度的异质性,位于黑河一级台地的老绿洲农田,非饱和带土壤质地特征及垂向分布有利于根系分布层作物对养分和水分的利用,下层黏土层的分布形成滞水层,有效阻止溶质向深层土壤和地下水的迁移,地下水未受硝态氮污染; 而在新垦绿洲沙地农田区,0 ~ 300 cm 土层相对均一的砂土质地,成为氮淋溶损失和地下水氮污染的敏感区域,地下水的多次循环利用加剧地下水硝态氮含量的持续增加,地下水NO_3^--N含量已严重超饮用水标准; 绿洲外围固沙带地下水NO_3^--N含量呈现增加的趋势. 对新垦沙地农田,实施减少氮淋溶损失和降低地下水氮污染的施肥和灌溉管理是需要关注的问题.

参考文献:

[1] Kraft G J, Stites W. Nitrate impacts on groundwater from irrigated-vegetable systems in a humid north-central US sand plain. Agriculture [J]. Ecosystems and Environment, 2003, **100**(1): 63-74.

[2] Gustafson A. Leaching of nitrate from arable land into groundwater in Sweden [J]. Environmental Geology, 1983, **5**(2): 65-71.

[3] Andersen L J, Kristiansen H. Nitrate in groundwater and surface water related to land use in the Karup basin, Denmark [J]. Environmental Geology, 1984, **5**(4): 207-212.

[4] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al*. Nitrate pollution of groundwater in Northern China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1996, **59**(3): 223-231.

[5] Gu B J, Ge Y, Chang S X, *et al*. Nitrate in groundwater of China: Sources and driving forces [J]. Global Environmental Change, 2013, **23**(5): 1112-1121.

[6] Lord E E, Mitched R D J. Effect of nitrogen inputs to cereals on nitrate leaching from sandy soils[J]. Soil and Use Management, 1998, **14**(2): 78-83.

[7] Peña-Haro S, Llopis-Albert C, Pulido-Velazquez M, *et al*. Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain[J]. Journal of Hydrology, 2010, **392**(3-4): 174-187.

[8] Smith K A, Anthony S G, Henderson D, *et al*. Critical drainage and nitrate leaching losses from manures applied to freely draining soils in Great Britain[J]. Soil Use and Management, 2003, **19**(4): 312-320.

[9] Connolly R D. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1998, **48**(1-2): 1-19.

[10] Pérez J M S, Antiguedad I, Arrate I, *et al*. The influence of nitrate leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country: a case study [J]. Science of the Total Environment, 2003, **317**(1-3): 173-187.

[11] Arauzo M, Valladolid M. Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: Implications for the implementation of the EU Nitrates Directive [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 179: 94-107.

[12] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 北京市平原农区深层地下水硝态氮污染状况研究[J]. 土壤学报, 2005, **42**(3): 411-418.

[13] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, **43**(3): 405-413.

[14] Hu K L, Huang Y F, Li H, *et al*. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain [J]. Environment International, 2005, **31**(6): 896-903.

[15] Chen J Y, Taniguchi M, Liu G Q, *et al*. Nitrate pollution of groundwater in the Yellow River delta, China [J]. Hydrogeology Journal, 2007, **15**(8): 1605-1614.

[16] 苏永中, 张智慧, 杨荣. 黑河中游边缘绿洲沙地农田玉米水氮用量配合试验[J]. 作物学报, 2007, **33**(12): 2007-2015.

[17] 金绍龄, 李隆, 张丽慧, 等. 小麦/玉米带田作物氮营养特点[J]. 西北农业大学学报, 1996, **24**(5): 35-41.

[18] Su Y Z, Yang R, Liu W J, *et al*. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated

cropland in arid region, China [J]. Soil Science, 2010, **175**(5): 246-254.

[19] Liu B, Zhao W Z, Chang X X, *et al*. Water requirements and stability of oasis ecosystem in arid region, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **59**(6): 1235-1244.

[20] Yang J E, Skogley E O, Schaff B E, *et al*. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, **62**(4): 1108-1115.

[21] Legg J O, Meisinger J J. Soil nitrogen budgets [A]. In: Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils [M]. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1982. 503-566.

[22] Su Y Z, Wang F, Zhang Z H, *et al*. Soil properties and characteristics of soil aggregate in marginal farmlands of oasis in the middle of Hexi Corridor Region, northwest China [J]. Agricultural Science in China, 2007, **6**(6): 706-714.

[23] Darwish T, Atallah T, Francis R S, *et al*. Observation on soil and groundwater contamination with nitrate: A case study from Lebanon-East Mediterranean [J]. Agricultural Water Management, 2011, **99**: 74-84.

[24] Simmelsgaard S E. The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil [J]. Soil and Use Management, 1998, **14**(1): 30-36.

[25] Cahn M D, Bouldin D R, Carvo M S. Nitrate sorption in the profile of an acid soil [J]. Plant and Soil, 1992, **143**(2): 179-183.

[26] Köhler K, Duynisveld W H M, Böttcher J. Nitrogen fertilization and nitrate leaching into groundwater on arable sandy soils [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, **169**(2): 185-195.

[27] Zotarelli L, Scholberg J M, Dukes M D C, *et al*. Monitoring of nitrate leaching in sandy soils: comparison of three methods [J]. Journal of Environmental Quality, 2007, **36**(4): 953-962.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 10

Oct. 15, 2014

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM_{10} and $PM_{2.5}$ Sampling ····· JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, *et al.* (3639)

Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012 ····· ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, *et al.* (3644)

Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region ····· CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, *et al.* (3651)

Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry ····· LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, *et al.* (3663)

NO_x and SO_2 Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO_x Emissions ····· REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, *et al.* (3669)

Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification ····· SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)

Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin ····· SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)

Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China ····· HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)

Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province ····· LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, *et al.* (3702)

Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake ····· BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)

Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing ····· WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, *et al.* (3716)

Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, *et al.* (3722)

Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area ····· CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, *et al.* (3731)

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin ····· WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)

Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary ····· YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, *et al.* (3748)

Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River ····· SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, *et al.* (3755)

Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake ····· LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, *et al.* (3764)

Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai ····· CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, *et al.* (3769)

Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well ····· BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, *et al.* (3775)

Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(Ⅱ) in Water ····· WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, *et al.* (3782)

Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids ····· WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, *et al.* (3789)

UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts ····· PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, *et al.* (3794)

Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO_2(P25) ····· WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)

Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor ····· TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, *et al.* (3807)

Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge ····· TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region ····· WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, *et al.* (3821)

Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China ····· DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, *et al.* (3830)

Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure ····· LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, *et al.* (3836)

Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump ····· LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, *et al.* (3842)

Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil ····· TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, *et al.* (3851)

Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil ····· ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, *et al.* (3862)

Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil ····· HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, *et al.* (3869)

Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product ····· ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, *et al.* (3874)

Bioremediation of Chromium(Ⅵ) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium ····· ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, *et al.* (3882)

Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures ····· LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, *et al.* (3888)

Effects of Elevated O_3 Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China ····· YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, *et al.* (3896)

Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in *Eucalyptus* Plantations with Different Soil Organic Carbon Content ····· LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, *et al.* (3903)

Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ^{13}C Isotope Labeling ····· CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)

Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants *Burkholderia xenovorans* LB400 Based System ··· CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, *et al.* (3918)

Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities ····· XIN Xin, YAO Li, LU Lei, *et al.* (3926)

Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment ····· WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, *et al.* (3933)

Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria ····· WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)

Predicting Copper Toxicity to *Hypophthalmichthys molitrix* and *Ctenopharyngodon idellus* Based on Biotic Ligand Model ····· WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, *et al.* (3947)

Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows ····· MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, *et al.* (3952)

Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life ····· ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, *et al.* (3959)

Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area ····· LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, *et al.* (3970)

Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene ····· MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, *et al.* (3977)

Catalytic Degradation of Naphthalene by $CuO(-CeO_2)/Al_2O_3$ ····· ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, *et al.* (3984)

Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality ····· XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)

Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China ····· ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, *et al.* (3998)

Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing ····· FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)

Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China ····· WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, *et al.* (4009)

Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China ····· ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, *et al.* (4015)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2014 年 10 月 15 日　第 35 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 10　Oct. 15, 2014

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行