

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应

齐玉春¹, 彭琴¹, 董云社^{1*}, 肖胜生^{1,2}, 贾军强^{1,3}, 郭树芳^{1,3}, 贺云龙^{1,3}, 闫钟清^{1,3}, 王丽萍^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 江西省水土保持科学研究所, 南昌 330029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 2009~2010 年, 选择内蒙古温带典型草原区 2 个不同退化程度羊草群落为研究对象, 利用小区模拟控制试验, 设置 0 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (CK)、10 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (MN) 这 2 个氮处理水平, 模拟研究了大气氮沉降水平变化对植物净初级生产力 (NPP), 土壤呼吸 (R_s) 以及整个群落碳收支 (NEE) 的定量影响, 比较了不同退化程度草地群落 NEE 对等量氮添加的响应差异。结果表明, 对于轻度退化羊草草原 (样地 A), MN 处理生长季平均地上生物量 (AGB) 两年分别比 CK 增加 21.5% 及 46.8%, 而对于中度退化羊草草原 (样地 B), 氮添加在 2009 年降低了植物 AGB 及地上 NPP (ANPP), 在 2010 年则表现为正效应; 两年氮添加均增加了样地 A 与样地 B 的根系生物量 (BGB) 以及样地 B 的地下 NPP (BNPP), 但降低了 2010 年样地 A 的 BNPP; 氮输入增加并未明显改变 R_s 的时间变化规律。与 CK 处理相比, 样地 A 的 MN 处理两年土壤微生物呼吸年累积通量较 CK 分别增加了 14.6% 与 25.7%, 而样地 B 则分别降低了 10.4% 与 11.3%; 样地 A 与样地 B 两年均表现为大气的碳汇, 碳汇强度 (以碳计) 分别为 59.22 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 与 166.68 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 以及 83.27 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 与 117.47 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。相对于 CK, 样地 A 两年碳汇增加量分别为 15.79 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 与 82.94 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 样地 B 分别为 74.54 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 与 101.23 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 单位氮输入量在初始氮水平低的草地群落能获得更大的增汇效应。

关键词: 羊草草原; 不同退化程度; 氮沉降; 净初级生产力; 碳排放; 碳收支

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0625-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.034

Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded *Leymus chinensis* Steppes in Inner Mongolia, China

QI Yu-chun¹, PENG Qin¹, DONG Yun-she^{1*}, XIAO Sheng-sheng^{1,2}, JIA Jun-qiang^{1,3}, GUO Shu-fang^{1,3}, HE Yun-long^{1,3}, YAN Zhong-qing^{1,3}, WANG Li-qin^{1,3}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on a field manipulative nitrogen (N) addition experiment, the effects of atmospheric N deposition level change on the plant biomass and net primary productivity (NPP), soil respiration (R_s) and net ecosystem exchange (NEE) were investigated respectively in 2009 and 2010 in two differently degraded *Leymus chinensis* steppes in Inner Mongolia of China, and the difference in the response of NEE to equal amount of N addition [$10 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, MN] between the two steppes was also discussed. The results indicated that for the light degraded *Leymus chinensis* steppe (site A), the average plant aboveground biomass (AGB) in MN treatment were 21.5% and 46.8% higher than those of CK in these two years. But for the moderate degraded *Leymus chinensis* steppe (site B), the N addition decreased the plant AGB and ANPP in 2009, while showed positive effects in 2010. N addition increased the belowground biomass (BGB) of the both sites and belowground NPP (BNPP) of site B in both years, but decreased the BNPP of site A in 2010. The increase of N input in the two steppes did not change the seasonal variation of R_s . The cumulative annual soil C emissions in MN treatment in site A showed an increase of about 14.6% and 25.7% of those in the CK respectively for these two years, while were decreased by about 10.4% and 11.3%, respectively in site B. The NEE of MN treatments, expressed by C, for the two steppes were 59.22 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ and 166.68 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, as well as 83.27 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ and 117.47 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, respectively in these two years. The increments in NEE originated from N addition for these two years were 15.79 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ and 82.94 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ in site A and 74.54 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ and 101.23 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ in site B. The N input per unit could obtain greater C sink effect in the steppe with lower initial N level.

Key words: *Leymus chinensis* steppe; different degraded degrees; N deposition; NPP; carbon emission; NEE

陆地生态系统碳收支及其影响机制是全球气候变化趋势预测以及减缓与适应对策制定的重要科学

收稿日期: 2014-08-21; 修订日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41373084, 41330528, 41203054); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX2-EW-302)

作者简介: 齐玉春 (1972~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为全球变化与陆地生态系统碳氮生物地球化学循环, E-mail: qiyu@igsnrr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

基础,也是当前全球变化研究的重点和难点^[1]. 增强生态系统固碳被认为是目前减缓大气 CO₂ 浓度升高最为经济可行且环境友好的方法^[2]. 因此,如何在全球变化情景下有效提高生态系统的固碳能力是当前及未来我们必须面对且亟待解决的一个重要科学问题.

气候变化、CO₂ 浓度升高、氮沉降以及土地利用变化是目前公认的四大主要碳汇影响机制^[3,4]. 在这几个关键影响因子中,氮沉降以及人为氮输入变化对碳循环过程的影响是目前四大碳汇机制研究相对薄弱,同时也是不确定性最大的环节之一^[4]. 氮素作为植物体内蛋白质、核酸、酶、叶绿素等的重要组成部分,其变化将会带来许多生命代谢过程的改变^[5]. 研究表明:氮素水平的高低对于植物光合速率及相关酶活性^[6],植物呼吸^[7],植物碳同化物质积累总量与分配格局^[8],土壤微生物的组成与结构^[9],土壤呼吸^[10]等均有重要影响,进而显著影响生态系统的碳平衡状态. de Vries 等^[11]综述了欧洲森林和欧石楠荒野生态系统的研究结果后指出,每 kg 氮的沉降通常会增加 5 ~ 75 kg 的碳吸收能力; Schimel^[12]的研究结果也表明,由于氮沉降抑制土壤呼吸作用可使陆地生态系统土壤碳贮量增加约 $(0.6 \pm 0.3) \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$,其中,1845 年以来氮输入带来的碳吸收累积量为 18.5 ~ 27.3 Pg,约占同期全球累计“碳失汇”(50 ~ 125 Pg)的 25%. 因此,明确生态系统碳源汇对大气氮沉降变化的响应与适应对于科学预测与调控陆地生态系统碳源汇功能、提高全球气候变化应对能力具有重要科学意义.

在中国,草地是分布面积最大的陆地生态系统,约占国土面积的 40% 左右. 由于长期过度放牧以及风蚀等的影响,草地土壤有效氮素供给存在严重不足,其碳源、汇对于氮输入的变化较其他生态系统更为敏感^[13]. 近几年我国草地陆续开展了较多氮沉降生态环境效应的试验研究,并取得了丰富的研究成果,但相关研究基本上还停留在植物光合生产特性^[14]、土壤呼吸^[15,16]、凋落物分解^[17]以及土壤微生物及养分变化等方面^[18,19],针对整个生态系统碳收支开展的研究成果还鲜见报道,不同退化程度草地碳收支对氮沉降变化响应差异的同期对比试验则更为鲜见. 基于此,本研究在我国内蒙古温带典型草原中选取了分布面积较大且退化程度不同、土壤初始氮水平差异较大的 2 个羊草群落为研究对象,通过连续两年的野外氮沉降模拟控制试验,分析了植物碳固定、土壤碳排放以及整个生态系统碳收

支对氮沉降变化的响应,定量比较了不同退化程度草地群落碳收支对等量氮输入的响应差异,以期为更准确地评估草地固碳潜力对未来氮沉降变化的定量响应奠定数据基础,为氮沉降变化情景下有效增加草地碳汇提供科学支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在内蒙古锡林河流域. 锡林河流域位于内蒙古高原东部,锡林郭勒高原的东部边缘 ($43^{\circ}26' \sim 44^{\circ}39' \text{N}$, $115^{\circ}32' \sim 117^{\circ}12' \text{E}$),是联合国教科文组织认定的国际生物圈保护区之一,同时也是 IGBP(International Geosphere-Biosphere Program)全球变化研究中国东北陆地样带草原部分的核心区域^[20]. 流域内从上游到下游依次分布有草甸草原,典型草原以及干草原等多种草地类型,其中,典型草原分布在地势较低的锡林河中、下游,是本地区分布最为广泛的草原类型,在中国温带草原区乃至整个欧亚大陆草原区均具有典型性与代表性. 典型草原区土壤类型为暗栗钙土或典型栗钙土,气候属温带大陆性草原气候,年降水量 350 ~ 450 mm,年均气温 $-0.3 \sim 1^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $1\,800 \sim 2\,000^{\circ}\text{C}$. 草原植物约 4 月底返青,10 月初枯黄,生长期约 150 d 左右^[21].

1.2 试验设计

本试验在典型草原区选取了退化程度不同的两个羊草草原群落作为研究对象建立控制试验小区. 选择的样地 A ($43^{\circ}33'3'' \text{N}$, $116^{\circ}40'31'' \text{E}$,海拔 1 265 m) 为轻度退化草原,建群种为根茎禾草羊草 (*Leymus chinensis*),优势种为大针茅 (*Stipa grandis*) 和冰草 (*Agropyron michnoi*) 等密丛禾草,土壤为暗栗钙土,土层深度约 100 ~ 150 cm,有机层厚度约为 20 ~ 30 cm. 2008 年生长季初,在选定的羊草草原内选取地势平坦,植被群落密度、盖度和种群结构具有代表性且植被土壤性质较为均一的地块,利用围栏网围封控制试验样地. 样地 A 共划分为 40 个试验小区,每个小区面积均为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,两两小区间设有 1 m 宽的缓冲隔离带,围栏网与中心区域四周各留有 5 m 的缓冲区. 小区氮添加处理水平的设置主要基于目前的自然氮沉降水平及其至本世纪末的可能变化^[22,23],同时参考国际上同类研究以及国内已有施氮试验^[14,24,25]. 根据欧洲大气氮沉降的长期监测结果,在过去的一个世纪,大气氮沉降量约增加了 5 ~ 10 倍,因此,在目前国内外许多氮沉降模拟试验中,通常采用短期内高于当前氮沉降水平 5 ~ 10

倍的氮输入剂量来模拟未来氮沉降变化的可能情景^[23]。基于 2000 年我国北方氮沉降 22.6 kg·(hm²·a)⁻¹ 的平均水平^[22], 样地 A 共设置 4 个氮添加水平, 分别为 0 kg·(hm²·a)⁻¹ (CK)、50 kg·(hm²·a)⁻¹ (LN)、100 kg·(hm²·a)⁻¹ (MN)、200 kg·(hm²·a)⁻¹ (HN), 每个处理各设 10 个重复小区, 不同处理的设置为完全随机区组设计。

另外, 试验还在临近区域选取了与样地 A 养分背景值相差较大的中度退化羊草草原(样地 B)进行同期比较研究。样地 B 距样地 A 直线距离约 11 km(43°32′49″N, 116°41′19″E, 1 250 m), 气候状况与样地 A 基本相同, 建群种也为羊草, 但由于长期

过度放牧, 群落已出现显著的退化特征, 植被稀疏, 优势种为冰草(*Agropyron cristatum*) 和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*) 等。土壤为暗栗钙土, 土层深度为 100 ~ 150 cm, 有机层厚度为 10 ~ 20 cm。样地 B 共划分 20 个 10 m × 10 m 的试验小区, 小区间以及中心区域与网围栏间的缓冲区宽度与样地 A 的设置相同。样地 B 共设置 2 个氮添加水平处理, 分别为 0 kg·(hm²·a)⁻¹ (CK) 与 100 kg·(hm²·a)⁻¹ (MN), 每个处理水平 10 个重复。本研究在样地 A 的 4 个处理水平中选择了 MN 及 CK 处理与样地 B 的等氮水平处理进行对比试验。样地 A 与样地 B 的土壤基本理化性状见表 1。

表 1 土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Soil physicochemical characteristics of the two *Leymus chinense* steppes

样地类型	土层深度 /cm	总有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	碳氮比	NH ₄ ⁺ -N 含量 /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N 含量 /mg·kg ⁻¹	容重 /g·cm ⁻³
样地 A	0 ~ 10	17.88 ± 2.32	1.95 ± 0.09	9.17 ± 1.00	2.67 ± 1.40	5.48 ± 4.01	1.13 ± 0.04
	10 ~ 20	14.16 ± 1.70	1.70 ± 0.07	8.31 ± 0.80	2.14 ± 1.12	1.90 ± 0.88	1.18 ± 0.10
	20 ~ 30	12.20 ± 1.39	1.51 ± 0.15	8.10 ± 0.42	1.95 ± 0.89	1.97 ± 1.67	1.33 ± 0.03
样地 B	0 ~ 10	15.89 ± 1.84	1.71 ± 0.21	9.30 ± 0.45	5.81 ± 4.19	6.30 ± 3.35	1.27 ± 0.03
	10 ~ 20	9.38 ± 1.56	1.07 ± 0.18	8.78 ± 0.69	3.59 ± 2.93	5.55 ± 5.18	1.24 ± 0.03
	20 ~ 30	6.32 ± 0.83	0.74 ± 0.14	8.63 ± 0.67	2.52 ± 1.33	3.67 ± 3.52	1.25 ± 0.02

1) 表中数据为平均值 ± 标准偏差(n = 3)

试验自 2008 年生长季开始, 进行了连续 4 a 的处理与采样。本文选取了氮处理的第 2 年与第 3 年开展了 2 个不同退化程度羊草群落碳收支对等量氮添加响应差异的对比研究。在每年当地多雨季节的 7 月初与 8 月初(研究表明, 温带草原区氮沉降多为脉冲式输入, 且多随降雨(雪)、降雾形式输入^[26]) 将拟添加的氮量均匀施入控制试验小区, 每次的氮添加量均为全年拟加氮量的一半。添加的氮肥为兼有铵态氮与硝态氮的高效复合中性氮肥硝酸铵钙(含氮量为 26%), 添加时将需要施入的氮量换算成每个小区所需的硝酸铵钙的量, 将硝酸铵钙充分溶于 20 L 水中, 以喷壶于施氮日清晨在草地人工来回喷洒, 对照小区不施肥, 但喷施等量的水, 以尽量减少因外加水因素导致的小区间羊草生长及土壤特征变化的差异。

1.3 测定方法

1.3.1 植物样品测定

地上生物量及根系样品分别利用收获法与根钻法进行采集。在每年 5 ~ 10 月, 利用收获法在样地 A 与样地 B 每个月测定一次生物量, 样方面积 1 m × 1 m, 7 月与 8 月各加密 1 次, 即 1 个月 2 次, 以捕捉年最大地上及地下生物量。取样时将植物地上部

分齐地面刈割, 并将活体和立枯分开, 同时收集地面凋落物。地上部植物样品采集后, 在原样方内利用根钻(内径 9.7 cm) 采集根系样品, 每个样方 9 钻, 根系样品采集深度为 40 cm, 分 0 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm 两层采集, 每次每个处理均设置 5 个重复。地上植物采集后除去表面黏污物, 在 105℃ 下杀青 15 min 后 65℃ 烘干至恒重(0.01 g), 根系样品采集后放置在 60 目(0.3 mm 孔径) 的尼龙根袋中, 利用流动水反复揉搓冲洗, 并漂洗剔除掉植物的种籽、虫卵等杂质, 区分活根与死根后分别装入纸袋烘干至恒重(80℃ 下烘 48 h)。烘干后的地上植物及根系样品经粉碎、过筛后, 测定其中的有机碳(TOC) 与全氮(TN) 含量。TOC 及 TN 含量的测定分别采用重铬酸钾-外加热法及凯氏定氮法^[27]。

根据常规草地生态学研究方法, 单位面积草地植物地上年净初级生产力(ANPP) 的确定一般采用极大现存量法, 也即: 将植物最大活体生物量作为植物 ANPP; 而植物地下净初级生产力(BNPP) 则根据一年内每个采集层次的最大根系生物量与最小根系生物量差值累加获得^[28]。本研究中, 根系生物量只采集到 40 cm 深度, 据黄德华等^[29] 对同一区域多种草地类型根系生物量垂直分布的研究结果表明, 植

物 0~40 cm 根系生物量约占整个地下生物量(0~130 cm)的 85.9%~86.8%,因此,这里选取 86.0% 作为 0~40 cm 根系生物量占全根系生物量的比例,同时假设地下生产力在各深度间的比例与根系生物量的比例相当,那么利用 0~40 cm 的 BNPP 即可折算出全根系总的 BNPP. 草地植物不同部位固碳量根据 ANPP、BNPP 与对应部位的含碳量相乘计算得到.

1.3.2 土壤碳排放测定

2009 与 2010 年生长季,在两个样地利用静态暗箱法采集气体样品. 气体采样频率为 5 月和 10 月每个月 2 次,6 月和 9 月每个月 3 次,7 月和 8 月氮处理后的 3、7、11、18、25 d 加密采样,遇降雨时采样日期顺延. 每次气体采集均在相对一致的时间采样,采样时间多选择在每个采样日的上午 09:00~10:00 左右,箱内植物地上部分已于采样前一日齐地面剪掉,每个处理 3 个重复. 每次采气持续时间为 21 min,分别采集盖箱后 0、7、14 以及 21 min 的气体样品. 每次采样时抽取观测箱内气体约 200 mL 置于密封气袋中,在实验室内利用 Licor6252 型红外 CO₂ 分析仪测定其中的 CO₂ 浓度. 土壤呼吸速率具体计算方法参见文献[30].

由于静态暗箱测定得到的土壤呼吸包含土壤微生物呼吸与根系呼吸两部分,因此,用以计算群落碳收支的土壤微生物呼吸应在测定的土壤呼吸的基础上扣除相应的根系呼吸. 据刘立新等^[31] 分别利用根系生物量外推法及根去除法对羊草退化草原的研究表明,根系呼吸占整个土壤呼吸的比例在整个生长季的平均值约为 38.6%~45.0%. 李凌浩等^[32] 的研究结果也认为,温带草地根系呼吸量占土壤总呼吸的比例为 30%~40% 之间是适宜的. 因此,本研究将 40% 作为根系呼吸占整个土壤呼吸的比例

进行计算,即:土壤微生物呼吸利用测定获得的土壤呼吸速率乘以 60% 得到.

1.3.3 草地群落碳收支的估算

草地群落与大气 CO₂ 的净交换 (NEE) 为植被对大气 CO₂ 的净同化吸收量 (TNPP) 与土壤微生物呼吸年累积通量 (R_m) 的差值. 其中, TNPP 利用 ANPP 与 BNPP 相加得到, R_m 则利用土壤微生物呼吸速率随时间的变化曲线与对应时间进行积分求算. NEE 的具体计算公式为:

$$NEE = TNPP - R_m \quad (1)$$

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 进行相应的数据计算与图件绘制; 同样地不同氮处理间生长季平均地上生物量、根系生物量以及不同处理间土壤微生物呼吸累积通量的差异均采用 One-way ANOVA 方法利用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 软件包完成.

2 结果和分析

2.1 氮添加对不同退化程度羊草群落植被生物量及 NPP 的影响

对于轻度退化的样地 A, 除个别月份外, 2 a 的氮添加均在一定程度上增加了植物地上生物量 (AGB), 见图 1. 从整个生长季的平均状况来看, 在氮处理第 2 年 (2009 年) 与第 3 年 (2010 年), MN 处理 AGB 比 CK 分别约增加 21.5% 与 46.8%, 随着施氮的进行, 氮添加对植物 AGB 的促进效应逐渐趋于显著. 而对于中度退化的样地 B, 2009 年氮输入的增加却普遍降低了植物 AGB, 生长季 MN 处理 AGB 比 CK 降低了 19.8%, 但 2010 年氮添加对 AGB 逐渐呈现出促进效应, MN 处理 AGB 比 CK 处理增加了 17.3%. 虽然 2 个样地不同年份氮添加对 AGB 的影响效应有所不同, 但对两年数据分别进行统计

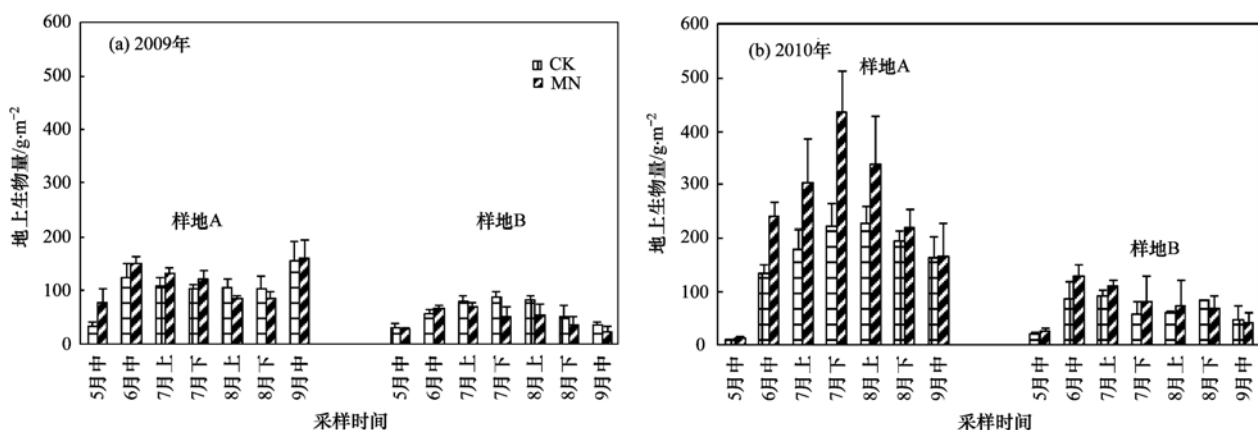


图 1 氮添加对不同群落植物地上生物量的影响及其年际变化

Fig. 1 Effect of N addition on plant aboveground biomass of different steppes and its inter-annual variation

分析后发现,2 个样地 MN 与 CK 处理间生长季平均 AGB 的差异均未达到 0.05 的显著性水平。

从根系生物量(BGB)的对比来看(图 2),两个群落在试验的第 2 年与第 3 年,MN 处理平均 BGB 较 CK 均有所增加. 对于样地 A,施氮第 2 年与第 3 年,MN 处理较 CK 分别平均增加 8.6% 和 8.5%,两年的增加幅度大体相当. 而对于样地 B,施氮第 2 年与第 3 年的增加幅度整个生长季平均为 19.9% 与 13.8%,两年均高于样地 A 的增加幅度. 但随着氮处理年限的增加,氮输入对 BGB 的促进作用逐渐有所下降. 与 AGB 相类似,2 个样地不同处理间平均 BGB 的差异也均未达到 0.05 的显著性水平。

此外,从年 NPP 的变化来看(图 3),2009 年氮添加对样地 A 的 ANPP,BNPP 及 TNPP 均有一定的促进作用,其中对 BNPP 的正效应最为明显. 但随着氮处理的进行,施氮对样地 A 植物地上部分生长的促进效应逐渐趋于明显,对根系生长的促进效应逐渐减弱. 试验的第 3 年,氮添加处理 ANPP 约增加了 38.2%,增加效应明显高于第 2 年,对 BNPP 的影响则由第 2 年的正效应变为负效应. 而对于样地 B,2009 年氮处理降低了植物 ANPP,2010 年则增加了 ANPP,对 BNPP 与 TNPP 的影响两年均呈现正效应,但氮添加处理 BNPP 的增幅由前一年的 47.8% 降为 36.8%.

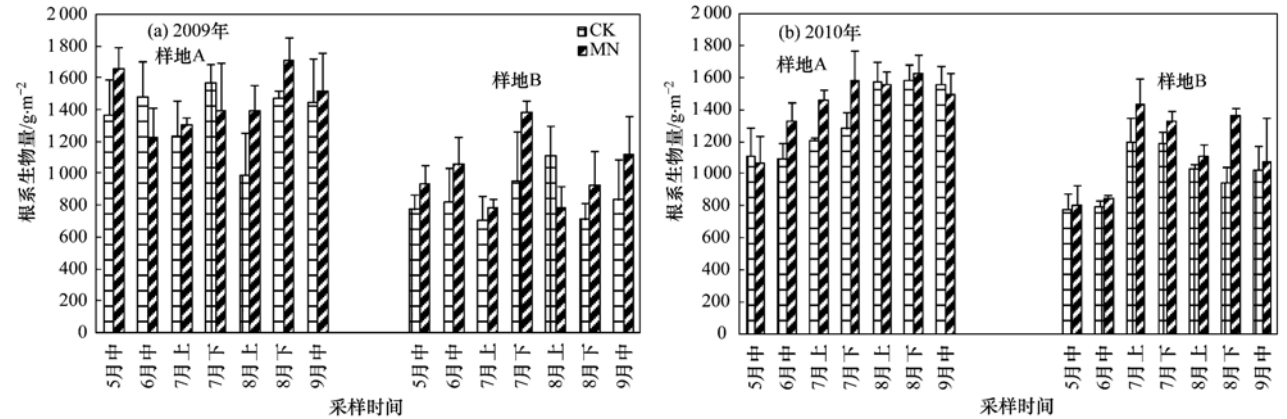
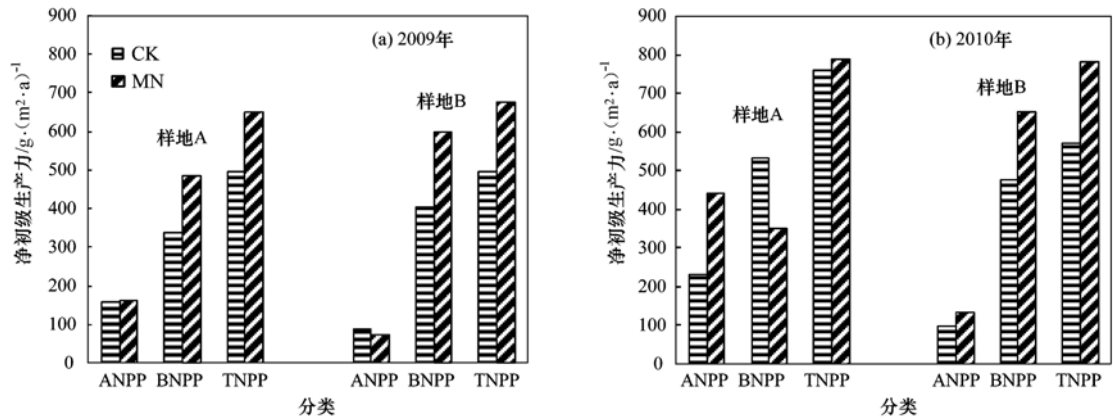


图 2 氮添加对不同群落植物根系生物量的影响及其年际变化

Fig. 2 Effect of N addition on plant belowground biomass of different steppes and its inter-annual variation



ANPP 为植物地上净初级生产力,BNPP 为植物地下净初级生产力,TNPP 为植物总初级生产力;CK 与 MN 分别指对照及氮添加处理

图 3 氮添加对不同群落植物 ANPP,BNPP 及 TNPP 的影响及其年际变化

Fig. 3 Effects of N addition on plant ANPP, BNPP and TNPP of different steppes and their inter-annual variations

2.2 氮添加对不同退化程度羊草群落土壤碳排放的影响

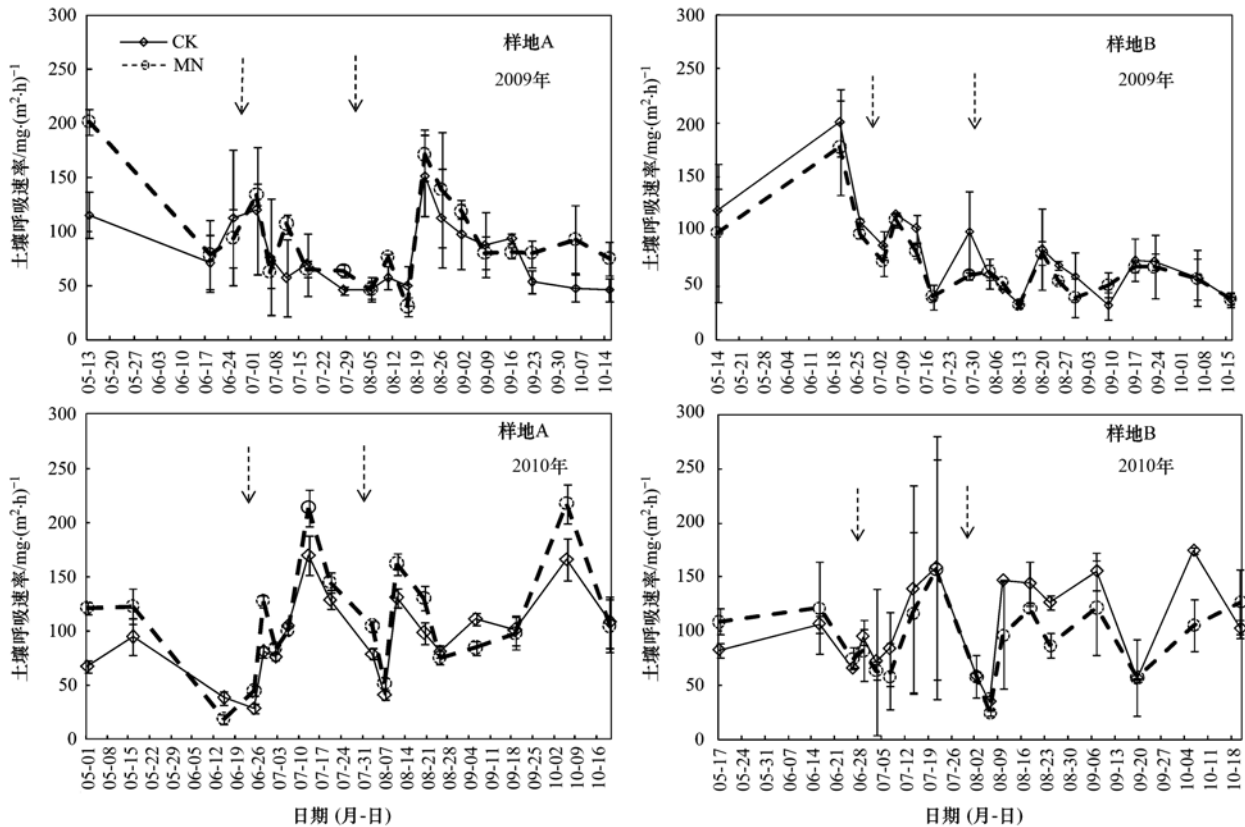
图 4 为样地 A 与样地 B 不同处理两年生长季土壤呼吸的季节变化曲线. 从中可以看出,同一样地不同氮处理小区土壤呼吸的季节动态呈现相似的变

化模式,氮输入增加并未明显改变土壤呼吸的时间变化规律. 尽管不同样地、不同年份土壤呼吸变化动态存在较大差异,但基本上均表现为每年第一次施氮后 3~5 d 出现土壤呼吸排放峰值,峰值持续 1~2 周左右,此后土壤呼吸速率多出现较大波动,2 次施氮之

间多呈两峰一谷的变化. 而在每年的第二次施氮后, 短时间内不同处理并未出现特别明显的排放高峰, 约在 15~20 d 后再次出现排放峰值. 从不同处理土壤呼吸速率的对比来看, 对于样地 A, 不同年份 MN 处理的土壤呼吸速率均略高于 CK 处理, 或与 CK 处理大体相当. 而对于样地 B, MN 处理土壤呼吸速率在大部分观测日则略低于 CK 处理.

另外, 将土壤呼吸去除根系呼吸后得到土壤微

生物呼吸, 并计算了土壤微生物呼吸的年累积通量 (图 5). 与 CK 处理相比, 样地 A 氮添加处理土壤微生物呼吸两年分别增加了 14.6% 与 25.7%, 而样地 B 氮添加处理两年则较 CK 分别降低了 10.4% 与 11.3%. 尽管同一样地各氮处理土壤微生物呼吸累积通量在数值上存在一定差异, 但进一步的方差分析表明, 不同年份 2 个样地 MN 与 CK 处理间的差异并未达到 0.05 的显著性水平 ($P > 0.05$).



虚线箭头所指日期为氮添加时间

图 4 氮添加对不同群落土壤呼吸速率季节变化动态的影响

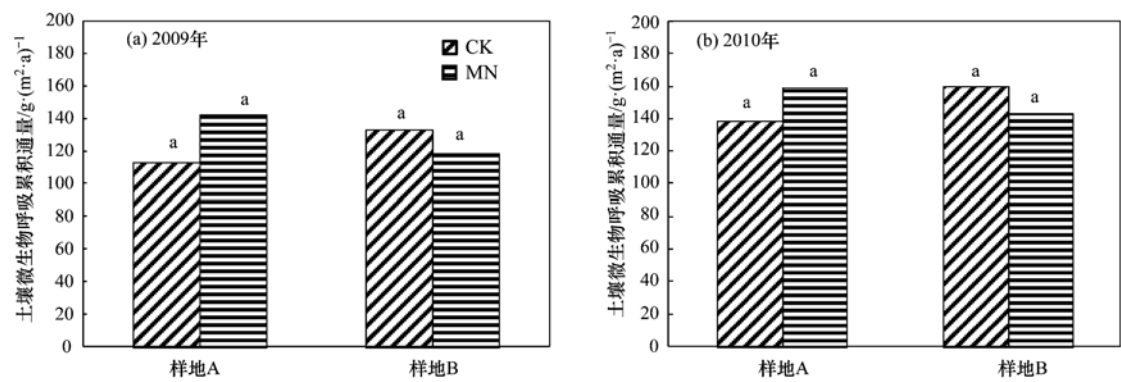
Fig. 4 Effect of N addition on the temporal dynamics of soil respiration rates

2.3 不同退化程度羊草群落碳收支对氮添加的响应

根据不同年份 2 个样地植被年 TNPP 以及土壤微生物呼吸年累积通量的估算结果, 分别计算和比较了 2 个样地不同氮处理的碳收支 (表 2). 从表 2 可以看出, 对于样地 A, 2009 年, MN 处理增加了植物 TNPP 及相应的固碳量, 其土壤微生物呼吸累积通量也高于 CK 处理, 也即: 无论是植物固碳还是土壤碳排放均表现为 MN 高于 CK. 综合分析不同处理碳收支 (NEE) 可以发现, 样地 A 不同处理均表现为大气的碳汇, CK 与 MN 处理的碳汇强度 (以碳计) 分别为 $43.43 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 与 $59.22 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, MN 处理相对于 CK 的碳汇增加量

(ΔNEE) 为 $15.79 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 而对于样地 B, 尽管不同处理也均表现为大气的碳汇, 但不同的是, 氮添加增加了植被的 TNPP, 却降低了 R_m , 碳固定与碳排放对氮添加相反的反应加大了氮添加处理的碳汇强度. 样地 B 中 CK 与 MN 处理的 NEE 分别为 $8.73 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 与 $83.27 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, MN 处理相对于 CK 的碳汇增加量约为 $74.54 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 对比 2 个样地氮添加处理的碳汇增加量可以发现, 同等氮输入水平对于样地 B 的碳增汇效应高于样地 A.

与 2009 年相类似, 2010 年 MN 处理增加了样地 A 与样地 B 的 TNPP 及样地 A 的 R_m , 降低了样地 B 的 R_m (表 2). 但与 2009 年有所不同, 由于降水条件



相同小写字母表示同一样地不同处理间差异未达到显著水平 ($P>0.05$)

图 5 氮添加对不同群落土壤微生物呼吸年累积排放通量(以 C 计)的影响

Fig. 5 Effect of N addition on the annual cumulative CO₂ effluxes of different steppes

表 2 等量氮输入对不同退化程度羊草群落碳收支的影响(以 C 计)¹⁾/g·(m²·a)⁻¹

Table 2 Effect of N deposition on the ecosystem C budget of differently degraded *Leymus chinensis* steppes/g·(m²·a)⁻¹

项目	2009 年				2010 年			
	样地 A		样地 B		样地 A		样地 B	
	CK	MN	CK	MN	CK	MN	CK	MN
TNPP	156.68	201.58	151.09	201.60	222.54	325.74	176.05	260.62
R _m	113.25	142.36	142.36	118.33	138.80	159.06	159.81	143.16
NEE	43.43	59.22	8.73	83.27	83.80	166.68	16.24	117.47
ΔNEE	15.79		74.54		82.94		101.23	

1) TNPP 为植物总净初级生产力, R_m 为土壤微生物呼吸年累积通量, NEE 为生态系统碳汇强度, ΔNEE 为氮添加处理的碳汇增加量

的明显改善,2010 年无论是 TNPP 还是 R_m 均较前一年明显升高,但降水量的改善对植物固碳能力的促进效应要明显大于对土壤碳排放的影响. 2010 年样地 A 中 CK 与 MN 处理 TNPP 较 2009 年分别增加了 42.0% 和 61.6%,而 R_m 则只分别增加了 22.6% 和 11.7%,因此,综合碳固定与碳支出,2010 年 MN 处理的 NEE [166.68 g·(m²·a)⁻¹] 高于 CK 处理 [83.80 g·(m²·a)⁻¹],且施氮后的碳汇增加量明显高于 2009 年. 与样地 A 相类似,样地 B 在 2010 年的 TNPP 以及 R_m 也高于 2009 年. 但与样地 A 相比,TNPP 与 R_m 的年际增加幅度均小于样地 A,CK 与 MN 处理植被 TNPP 分别较 2009 年增加约 16.5% 与 29.3%,R_m 分别约增加 12.3% 和 21.0%,TNPP 的增幅高于 R_m. 因此,2010 年样地 B 氮添加后的碳汇增加强度也高于 2009 年,水分条件的改善增强了氮添加对碳汇的正效应.

3 讨论

3.1 氮添加对草地植被固碳量及其垂直分配格局的影响

初级生产力的形成是大气碳向草地生态系统输入的主要途径,它主要包括地上和地下初级生产力

两部分. 比较不同退化程度羊草群落植被地上、地下生物量及 NPP 可以看出,2 个草地群落地上、地下生物量及不同部位 NPP 对氮输入增加的响应存在较大差异. 对于轻度退化的样地 A,2 a 的氮添加处理均增加了植物 AGB、ANPP 以及 TNPP,且随着施氮的进行,氮输入增加对 AGB 及 ANPP 的促进效应逐渐趋于显著,对 BNPP 的影响效应则由前一年的正效应转变为负效应. 这种变化与李明月等^[33] 在中国亚热带木荷幼苗林以及 Marler 等^[34] 对美国西南部多个树种的氮添加模拟试验结果相类似. 温带典型草原区由于长期过度放牧,土壤处于氮缺乏状态,因此,氮输入的增加能迅速提高土壤中可利用氮的含量,并通过提高叶片核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)以及叶绿素含量等带来植物光合能力的提高. 但随着土壤养分条件逐渐得以改善,根据最优分配假说,此时植物根系不再需要很大的能量来吸收养分,植物将更多的生物量分配到地上碳同化器官以提高对光照的竞争力,根冠比降低^[35]. 这种地上、地下生物量分配的变化是草地植物对土壤养分状况变化的一种应答策略,有利于植物种群的繁衍与扩张^[14].

与样地 A 相比,退化较严重的样地 B 其生物量

垂直分配对养分变化的响应有所不同. 与 CK 处理相比, MN 处理 AGB 呈现先降低后增加的变化, BGB 则始终表现为正效应且两年 BGB 的增加幅度均大于样地 A. 分析原因, 样地 B 的土壤初始氮水平较低, 由于植物生长对氮的需求与实际土壤可利用氮水平差异较大, 因此早期施氮后, 土壤可利用氮仍然较低, 无法很好地满足植物地上、地下共同生长对氮养分的需求, 植物地上部分更多地是转移到根系以吸收更多的养分, 根系生长相对旺盛而地上部分生物量反而有所降低. 且由于土壤基础氮水平较低, 在氮处理的第 3 年, 氮添加对根系生长仍然表现出较强的促进作用, 但氮限制性较前一年有所减弱, 因此, 植物地上部分的生长也有所促进以提高自身的光竞争能力.

此外, 除了生物量分配对氮添加的响应存在较大年际变化外, 2 个样地不同处理 TNPP 以及施氮后 TNPP 的增幅均表现为 2010 年高于 2009 年. 两年降水的差异可能是不同样地 TNPP 及其增幅发生年际变化的主要原因. 2009 年与 2010 年两年的年降水量分别为 281.1 mm 与 318.6 mm, 其中, 5~10 月生长季降水量分别为 209.7 mm 与 256.9 mm, 均表现为 2010 年明显高于 2009 年. 在干旱、半干旱生态系统中, 除氮素外, 水分也是制约生态系统生产力的关键因素^[36], 一方面, 水分的改善本身会促进植物的生长. Ni^[37] 对我国北方温带草原地上 74 个样地 141 个样方的数据进行分析表明, 地上生物量与年降水量、夏季的降水量呈明显正相关; 另一方面, 水分也会通过影响氮素在土壤中的转化、迁移以及有机体对养分吸收、运转与分配等而对植物生长产生间接影响^[38]. 由此可以看出, 氮素添加对草地群落 NPP 的影响也依赖于降水等因素的变化, 开展水分和氮素等多因子耦合作用效应研究对于正确评估与预测未来氮沉降变化对草地群落固碳能力的影响也至关重要.

3.2 氮添加变化对土壤 CO₂ 累积排放通量的影响

通过土壤呼吸作用向大气释放 CO₂ 是草地碳输出的主要途径. 从连续两年的试验结果来看, 连续两年施氮均增加了样地 A 土壤微生物呼吸的累积排放通量, 这与 Xu 等^[15] 和 Verburg^[39] 在草地, Priess 等^[40] 与莫江明等^[41] 在森林以及 Wilson 等^[42] 在农田的研究结果相类似. 在氮养分缺乏的生态系统中, 外源氮的输入一方面可使土壤中可利用氮的数量增加, 促进了植物的生长, 使得更多的植物残体以及凋落物返还土壤, 增加了土壤微生物降解的碳

源, 促进了土壤微生物的呼吸^[43], 同时, 增加的氮与有机物质结合也会在一定程度上降低土壤 C/N, 加速土壤有机物的分解^[44]; 另一方面, 施氮还在一定程度上促进了作物根系生长, 根系呼吸也得到增强^[45]. 样地 A 施氮处理地上、地下生物量的测定结果进一步证明了这一点. 与此同时, 本试验在 2009 年 8 月以及 2010 年 8 月对样地 A 土壤微生物与土壤酶的研究结果也表明, MN 处理增加了土壤微生物群落的 Shannon 指数和 Simpson 指数以及表征土壤微生物碳源利用率的平均孔颜色变化率值 (average well color development, AWCD), 提高了土壤蔗糖酶的活性^[46], 促进了土壤有机碳的分解和转化.

而对于退化较严重的样地 B, 两年施氮则降低了土壤的碳排放. 少量的氮添加在 2009 年并没有带来样地 B 中 AGB 的增加, 相反还有所降低, 相应减少了凋落物对土壤有机质的碳返还. 此外, 土壤-植物-微生物对氮素的响应是一个统一的整体, 植物与微生物对氮有着较强的竞争关系, 由于样地 B 土壤氮可利用性较样地 A 更低, 在有限的养分条件下, 施入土壤中的氮可能大部分被植物吸收, 从而使得微生物得不到充分的氮用于自身繁殖^[46,47], 抑制了土壤微生物的生长, 进而在一定程度上降低了土壤微生物的呼吸. 此外, 微生物在进行自身物质合成时, 除了需要氮营养物质外, 还需要能源物质碳的参与, 只有在碳源和氮源均较充足的情况下, 微生物才能保持较高的活性^[48]. 样地 B 由于长期过度放牧, 土壤有机碳以及氮素含量均较低, 0~30 cm 不同土层土壤有机碳含量分别比样地 A 低 11.1%~48.2%, 碳源的缺乏削弱了氮添加对于土壤呼吸的促进作用. 由此可以看出, 在氮沉降增加的背景下, 碳源供应状态是土壤呼吸是否持续增加的重要影响因素, 因此, 充分考虑碳氮的互作效应对于正确预测氮沉降变化情景下生态系统固碳潜力的变化也同样至关重要.

3.3 不同退化程度羊草群落碳增汇效应比较

本研究中, 氮添加提高了整个生态系统的碳汇强度. 但相对于明显增加的植被 NPP 而言, MN 处理对 2 个样地土壤微生物呼吸的促进作用相对较小甚至施氮后样地 B 土壤微生物呼吸累积通量还有所降低, 王珍^[49] 对荒漠草原的研究结果也发现, 氮素的添加显著增加了总生态系统生产力 (GEP) 以及生态系统呼吸 (ER), 但对 GEP 的影响显著高于对 ER 的影响, 氮添加显著增加了荒漠生态系

统净碳吸收; Xia 等^[50]对内蒙古多伦克氏针茅草原的研究也得到类似的结果. 对 ER 影响小的原因可能与自养呼吸和土壤异养呼吸对氮沉降通常存在相反的响应有关^[15]. 植物自养呼吸通常随着根系生物量以及叶片氮含量的增加而增加^[51], 但微生物的活性及呼吸常常会由于微生物和植物对氮的竞争而有所降低^[52]. 此外, 也有研究表明, 氮添加后植物固碳量和土壤呼吸量的增量大体相当, 对碳平衡无太大影响^[10,53], 而张丽华等^[54]对三江平原小叶章沼泽化草甸的研究则表明, 氮输入对土壤呼吸的影响远大于对光合作用的影响, 从而导致 NEE 的明显降低. 与此同时, 对东北松嫩草地连续 4 a 的研究结果还发现, 在雨水相对较好的 2007 ~ 2009 年, 氮添加显著增加 NEE, 而降雨量较低的 2006 年, 氮添加对 NEE 的增加不显著^[55]. 由此可以看出, 不同研究结果的差异除了与草地类型以及施氮量的差异有关外, 温度、降水等气候因子对于草地 NEE 对氮沉降的响应也存在重要的影响.

同时, 对比本研究 2 个羊草群落碳收支变化可以发现, 尽管退化程度较轻的样地 A 其碳汇强度大于退化较为严重的样地 B, 但后者施氮后相对于 CK 的增汇潜力要高于前者, 也即: 单位氮输入量在氮初始水平低的草地群落能获得更大的增汇效应, 但其长期效应是否如此还有待于进一步的验证.

4 结论

(1) 对于轻度退化羊草群落, 两年氮添加均提高了 AGB, BGB 及 ANPP, 但对 BNPP 的影响逐渐由正效应转化为负效应; 而对于中度退化羊草群落, 氮添加在 2009 年降低了植物 AGB 及 ANPP, 2010 年 AGB 及 ANPP 则分别增加了 17.3% 与 38.2%. 两年氮添加对 BGB 及 BNPP 始终表现为正效应, 但 BNPP 的增幅从 2009 年的 47.8% 降为 2010 年的 36.8%. 随着氮处理年限的增加, 施氮对地上植物生产的促进效应逐渐趋于明显, 对根系生长的促进效应逐渐减弱.

(2) 氮输入增加并未明显改变土壤呼吸的时间变化规律. 轻度退化羊草群落氮添加促进了土壤微生物呼吸, 两年累积通量分别增加了 14.6% 与 25.7%, 而中度退化羊草群落氮添加则降低了土壤微生物呼吸, 两年分别降低 10.4% 与 11.3%.

(3) 退化程度不同 2 个羊草群落各处理两年均表现为大气的碳汇. 相对于 CK, 样地 A 氮处理两年

碳汇增量分别为 $15.79 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 与 $82.94 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 样地 B 分别为 $74.54 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 与 $101.23 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 单位氮输入量在氮初始水平低的草地群落将获得更大的增汇效应.

参考文献:

- [1] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto protocol[J]. *Science*, 1998, **280**(5368): 1393-1394.
- [2] 王秋凤, 刘颖慧, 何念鹏, 等. 中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题[J]. *地理科学进展*, 2012, **31**(1): 78-87.
- [3] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993, **363**(6426): 234-240.
- [4] Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data[J]. *Tellus B*, 1996, **48**(4): 420-432.
- [5] Liu J X, Price D T, Chen J M. Nitrogen controls on ecosystem carbon sequestration: a model implementation and application to Saskatchewan, Canada [J]. *Ecological Modelling*, 2005, **186**(2): 178-195.
- [6] Sims D A, Luo Y, Seemann J R. Comparison of photosynthetic acclimation to elevated CO_2 and limited nitrogen supply in soybean[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1998, **21**(9): 945-952.
- [7] Lusk C H, Reich P B. Relationships of leaf dark respiration with light environment and tissue nitrogen content in Juveniles of 11 cold-temperate tree species [J]. *Oecologia*, 2000, **123**(3): 318-329.
- [8] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, *et al.* Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests[J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(3): 238-253.
- [9] Compton J E, Watrud L S, Porteous L A, *et al.* Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**(1): 143-158.
- [10] Lai C T, Katul G, Butnor J, *et al.* Modelling the limits on the response of net carbon exchange to fertilization in a south-eastern pine forest [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, **25**(9): 1095-1120.
- [11] de Vries W, Solberg S, Dobberty M, *et al.* The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(8): 1814-1823.
- [12] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77-91.
- [13] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1.
- [14] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(2): 311-317.
- [15] Xu W H, Wan S Q. Water-and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire and nitrogen fertilization in a

- semiarid grassland in northern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(3): 679-687.
- [16] Peng Q, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on soil respiration in temperate grassland in Inner Mongolia, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(6): 1163-1171.
- [17] Peng Q, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Decomposing litter and the C and N dynamics as affected by N additions in a semi-arid temperate steppe, Inner Mongolia of China [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, **6**(4): 432-444.
- [18] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 等. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3073-3082.
- [19] Sun L J, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* Intra-and inter-annual variation of soil microbial and enzymatic response to water and nitrogen addition in a Chinese semi-arid steppe[J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2014, **8**(2): 1339-1351.
- [20] 张新时, 高琼, 杨奠安, 等. 中国东北样带的梯度分析及其预测[J]. *植物学报*, 1997, **39**(9): 785-799.
- [21] 李博, 雍世鹏, 李忠厚. 锡林河流域植被及其利用[A]. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草地生态系统研究第3集[C]. 北京: 科学出版社, 1988. 84-184.
- [22] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [23] Dise N B, Stevens C J. Nitrogen deposition and reduction of terrestrial biodiversity: Evidence from temperate grasslands [J]. *Science China Series C: Life Sciences*, 2005, **48**(S1): 720-728.
- [24] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对N沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, **24**(7): 1413-1420.
- [25] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等. 模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1726-1732.
- [26] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. *生态学报*, 2009, **29**(7): 3835-3845.
- [27] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 67-82.
- [28] 姜恕. 草地生态研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [29] 黄德华, 陈佐忠, 张鸿芳. 贝加尔针茅、克氏针茅、线叶菊草原地下生物量的比较研究[A]. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草地生态系统研究第2集[C]. 北京: 科学出版社, 1988. 122-131.
- [30] Qi Y C, Liu X C, Dong Y S, *et al.* Differential responses of short-term soil respiration dynamics to the experimental addition of nitrogen and water in the temperate semi-arid steppe of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(4): 834-845.
- [31] 刘立新, 董云社, 齐玉春. 锡林河流域生长季节不同草地类型根系呼吸特征研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2376-2381.
- [32] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J]. *植物生态学报*, 2002, **26**(1): 29-32.
- [33] 李明月, 王健, 王振兴, 等. 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与C、N、P分配格局[J]. *生态学报*, 2013, **33**(5): 1569-1572.
- [34] Marler R J, Stromberg J C, Patten D T. Growth response of *Populus fremontii*, *Salix gooddingii*, and *Tamarix ramosissima* seedlings under different nitrogen and phosphorus concentrations [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, **49**(1): 133-146.
- [35] 樊维, 蒙荣, 陈全胜. 不同施氮水平对克氏针茅草原地上地下生物量分配的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2010, **31**(2): 74-75.
- [36] Mirza M Q, Warrick R A, Ericksen N J, *et al.* Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna river basins [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1998, **43**(6): 845-858.
- [37] Ni J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China [J]. *Plant Ecology*, 2004, **174**(2): 217-234.
- [38] 上官周平, 李世清. 旱地作物氮素营养生理生态[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [39] Verburg P S J, Arnone III J A, Obrist D, *et al.* Net ecosystem carbon exchange in two experimental grassland ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(4): 498-508.
- [40] Priess J A, Fölster H. Microbial properties and soil respiration in sub montane forests of Venezuelan Guyana; characteristics and response to fertilizer treatments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(4-5): 503-509.
- [41] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤CO₂排放和CH₄吸收对模拟N沉降的短期响应[J]. *生态学报*, 2005, **25**(4): 682-690.
- [42] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO₂ emissions in central Iowa [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**(3): 264-270.
- [43] 彭琴, 董云社, 齐玉春. 氮输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(8): 874-883.
- [44] 张炜, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响[J]. *生态学报*, 2008, **28**(5): 2309-2319.
- [45] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(1): 18-24.
- [46] 何亚婷. 施氮和土地利用方式改变对内蒙古温带半干旱草地土壤微生物特性的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012. 39-41, 49.
- [47] Wang J G, Bakken L R. Competition for nitrogen during mineralization of plant residues in soil: microbial response to C and N availability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**(2): 163-170.
- [48] 张乐. 不同C源对外源N土壤微生物固持的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008. 33.

- [49] 王珍. 增温和氮素添加对内蒙古短花针茅荒漠草原植物群落、土壤及生态系统碳交换的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012. 63.
- [50] Xia J Y, Niu S L, Wan S Q. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(6): 1544-1556.
- [51] Tu L H, Hu T X, Zhang J, *et al.* Short-term simulated nitrogen deposition increases carbon sequestration in a *Pleioblastus amarus* plantation[J]. *Plant and Soil*, 2011, **340**(1-2): 383-396.
- [52] Phillips R P, Fahey T J. Fertilization effects on fineroot biomass, rhizosphere microbes and respiratory fluxes in hardwood forest soils[J]. *New Phytologist*, 2007, **176**(3): 655-664.
- [53] Saarnio S, Järviö S, Saarinen T. Minor changes in vegetation and carbon gas balance in a boreal mire under raised CO₂ or NH₄NO₃ supply[J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(1): 46-60.
- [54] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1257-1263.
- [55] 蒋丽. 松嫩草地光合特性对增温和氮素施加的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2012. 38.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行