

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

基于N:P化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究

张仁懿,徐当会,陈凌云,王刚

(兰州大学生命科学学院,草地与农业生态系统国家重点实验室,兰州 730000)

摘要: 土壤养分条件影响不同功能群植物的养分状况与生长,这在施肥实验中已得到充分验证。然而,自然养分梯度下植物-土壤养分耦合关系的研究仍然缺乏。基于植物N:P化学计量学特征,本研究探讨青藏高原亚高寒草甸自然养分梯度下不同功能群植物氮状况及生物量变化。2008年、2009年N:P比值分别为9.83和11.57,其低群落N:P比验证了该地区自然植被主要受到N素的限制。偏冗余分析(partial RDA)结果显示,随着土壤氮素可利用性的增加杂草生物量比例上升,而豆科、禾草生物量比例下降。豆科的固氮作用以及禾草的高养分利用效率分别提高其在氮限制植被中的竞争力;这些结果表明,全球氮沉降的增加将提高杂草的优势度。豆科生物量比例与群落、非豆科植物的N:P显著正相关,表明豆科植物能够改善群落的氮状况,包括降低非豆科植物的氮限制水平。

关键词: 矿化; N:P化学计量学; 硝化; 亚高寒草甸; 功能群

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1131-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.03.044

Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau: Base on the N:P Stoichiometry

ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, WANG Gang

(State Key Laboratory of Grassland and Agro-Ecosystems, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Plants from different functional groups show distinct response to nitrogen (N) addition, however, the patterns and underlying mechanisms across the natural N availability gradient remain unexplored. In present studies, effects of soil N fertility on aboveground N pools and production were examined, and the N:P stoichiometry was compared among forbs, graminoids, and legumes on an alpine grassland located in northeast of Qinghai-Tibet Plateau. Mean N:P ratios of the whole community in 2008 and 2009 were 9.83 and 11.57, respectively, indicating that the sub-alpine grassland was mainly N-limited. The partial redundancy analysis (partial RDA) showed that the biomass percentage of forbs increased, while those of legumes and graminoids decreased with the soil N availability. It suggested that legumes and graminoids were more competitive than forbs in the natural N-limited grassland, which may be due to the N_2 -fixation ability and high nutrient use efficiency, respectively. Under the projected increasing N deposition, the vegetation tended to shift from graminoids and legumes to forbs. Significant relationships were found between the percentage of legumes biomass and N:P (phosphorus) ratio for the whole community and non-legumes, indicating that legumes could improve the community N status as well as non-legumes N status on the alpine grassland.

Key words: nitrogen mineralization; N:P stoichiometry; nitrification; sub-alpine meadow; functional groups

氮(N)和磷(P)是陆地植物的基本元素,其供应制约着陆地生态系统中的大多数过程,为陆地生态系统生产力的主要限制因素^[1,2]。高山植被土壤养分的可利用性受到低温的限制,其中植物可利用N的释放对温度尤其敏感^[3],土壤中植物可利用氮对该地区植物生长比其它元素更为关键^[4]。氮矿化量与植物生长和生物量密切相关,它包括两个过程,即硝化和铵化^[5]。氨化作用产生的铵态氮往往经硝化细菌的作用最终转化成硝态氮,因此硝化作用成为矿化作用的主要过程^[5,6]。预计未来50~100 a间,气候变化将使全球平均温度升高1~3.5℃^[7],在此背景下,高山生态系统氮素循环进程将加速,群落结构也将发生变化^[8]。

土壤养分条件直接影响植物对养分的吸收与利用、植物氮、磷化学计量特征以及生物量分配和生态策略^[9,10]。植物矿质养分含量取决于土壤养分的可利用性,其N:P化学计量特征在一定程度上表征所在环境的氮、磷养分条件^[9,11]。研究表明,N:P比值可有效地用于判断植物个体、群落和生态系统的氮、磷养分限制格局。Güsewell^[9]认为陆地植物N:P比<10和>20分别表示植被受到氮限制和磷限制,两者之间则为氮、磷共限制;Tessier等^[10]认为湿地植物N:P比临界值为14和16。氮、磷营养含量的绝

收稿日期: 2013-07-03; 修订日期: 2013-08-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(Lzujbky-2012-109, Lzujbky-2013-95); 国家自然科学基金项目(312704721)

作者简介: 张仁懿(1983~),男,博士,实验师,主要研究方向为植物生态学,E-mail: zrenyi@lzu.edu.cn

对值也被用于判断特定植被的限制类型^[12, 13]。例如, Wassen 等^[13]提出, 当氮含量小于 $13 \sim 14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和磷含量低于 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别说明了湿地生态系统植物受到氮的限制和磷的限制; 而 Güsewell 等^[12]认为, 氮限制没有明确的临界值, 而磷含量低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 意味着植被生产力受磷缺乏的影响。

不同物种、不同功能群植物之间的氮、磷化学计量存在显著差异, 这些差异是它们对养分条件的适应过程中采取不同策略的前提或结果^[9, 14]。固氮植物由于其额外的氮素来源, 不易受到土壤氮素可用性的限制, 常常具有较高的氮含量^[15]; 相反, 非固氮植物保持较高的氮利用率以充分利用体内有限的氮素资源^[16]。全球尺度研究表明, 禾本科植物具有较低的氮、磷含量和更高的 N:P 比值^[9, 11, 17], 可能与其对资源添加作出快速有效的响应相关^[18, 19]。植被水平的化学计量学特征, 是群落结构、营养供应水平以及它们之间交互作用共同影响的结果^[9, 19, 20]。研究群落水平 N:P 化学计量随环境养分状况的变化, 需考虑群落组成的变化和组间化学计量特征的差异。

现有关于植物-土壤养分关系的研究主要集中在资源添加方面^[21, 22], 而忽略了自然养分条件下才是平衡系统的事实。资源添加引起土壤养分可利用性的短暂改善或过剩, 群落植物尤其是高养分吸收速率的物种对土壤养分迅速同化, 高土壤养分状况通常不能保持; 而自然养分的变化缓慢, 经过植物-土壤长期的相互作用, 土壤养分状况相对稳定^[2, 23]。本研究通过对青藏高原亚高寒草甸样地 2a 的调查, 结合植物的 N-P 化学计量特征, 讨论不同功能群植物的养分状况及土壤-植物养分状况耦合关系, 以期对群落发展方向做出正确的预测。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

实验地点位于甘南藏族自治州合作市的兰州大学高寒草甸与湿地生态系统定位研究站 (N $34^{\circ}55'$, E $102^{\circ}53'$), 海拔约为 3 000 m。该实验点处青藏高原东北部, 为寒温湿润的高原气候, 根据合作气象站的资料显示, 该地年平均气温 2.4°C , 年平均降雨量为 530 mm, 年平均蒸发量 1 200 mm; 植被类型属于多年生草本植物占优势的亚高寒草甸, 优势种为柴胡 (*Bupleurum smithii*)、兰石草 (*Lancea tibetica*)、蒲公英 (*Taraxacum lugubre*)、狼毒 (*Stellena*

chamaejasme)、甘青蒿 (*Artemisia tangutica*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla ansrina*)、矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、米口袋 (*Gueldenstaedtia diversifolia*)、棘豆 (*Oxytropis kansuensis*)、披针叶黄华 (*Thermopsis lanceolat*) 等。

1.2 实验设计

约 120 hm^2 的禁牧区内, 随机选择坡度、坡向一致的区域作为实验样点, 2008 年、2009 年样点数分别为 24、12 个, 样点间距 10 m。每个样点 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) 设置 3 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 小样方 (图 1), 于每年 8 月下旬调查样方内的物种数、个体数、多度和盖度。调查后地上部分分禾 (禾本科、莎草科), 非豆科杂草和豆科 3 个功能群取样, 装入纸袋后带回实验室分析。植物材料 70°C 烘 48 h 至恒重, 称重精确至 0.001 g 。

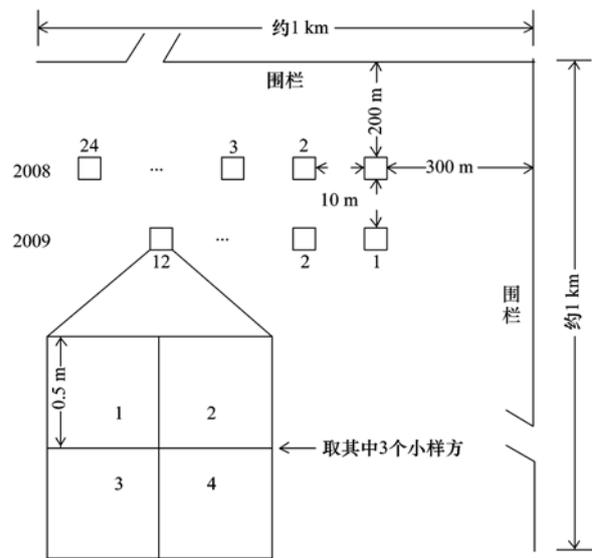


图 1 实验采样点布置示意

Fig. 1 Distribution map of sampling plots

在每个样方内使用 5 cm 孔径的土钻取 3 个不同位置 0 ~ 15 cm 的土壤, 装入采样袋带回实验室进行前期处理。样品采集后在室温条件下经过 30 d 以上的风干过程后, 过 0.15 mm 筛孔备用, 以供土壤因子的分析。

土壤全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{:CuSO}_4\text{:Se}$ 催化法消煮。消煮后的溶液经定容、沉淀和稀释后用仪器 SmartChem 200 化学分析仪 (WestCo Scientific Instruments, Brookfield, CT, USA) 进行测定。土壤全磷经过硫酸-高氯酸法消煮后, 采用钼蓝比色法测定^[24]。重铬酸钾热容量法测定土壤有机 C 的含量。速效磷采用 NaHCO_3 法提取, 钼蓝比色法测定。土壤中的硝态氮和铵态氮采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 提取。

提取液经过滤后,以 SmartChem 200 化学分析仪对滤液中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量进行测定,硝态氮和铵态氮的总和为有效氮. 土壤 pH 的测定以水:土样 = 2.5:1 的比例进行测定; 风干土含水量采用 105°C 烘干法进行测定,用以校正土壤因子为烘干土的含量.

土壤净氮矿化(硝化 + 氨化)采用原位培养的方法^[5, 19, 20]. 每年 6 月中旬,5 个直径 5 cm、长 15 cm 的 PVC 管插入所选样点四角及中心的土壤中,取出含土壤的 PVC 管以断开培养土壤与植物根系的联结,其中 3 个 PVC 管上端封口(扎一个小孔,以保证空气想通而防止氮淋溶),埋入原地培养 60 d 后取回分析; 另外 2 管土样立即带回进行 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的分析(方法同土壤速效氮的测定).

硝化速率 = 硝化量 / 培养天数;

氨化速率 = 氨化量 / 培养天数;

矿化速率 = 硝化速率 + 氨化速率.

相同功能群的植物样经研磨后过筛,采用 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮法消煮^[25]. 其中,植物样品的氮含量用 SmartChem 200 分析测定; 而采用钼蓝比色法测定样品的磷含量. 功能群的平均氮、磷含量和地上氮、磷库,以及植物群落的平均氮、磷含量和地上氮、磷库的计算方法如下(X 为氮或磷):

功能群 X 含量 = (叶含量 × 叶生物量 + 非叶含量 × 非叶生物量) / 功能群生物量

地上 X 库 = \sum (功能群 X 含量 × 功能群生物量)

群落 X 含量 = 地上 X 库 / 群落总生物量

1.3 数据分析

化学计量学特征的功能群差异采用方差分析 (ANOVA, Tukey's post hoc test) 的方法分析. 使用线

性回归来分析 N:P 比与豆科生物量比例之间的联系; 利用独立样本 t 检验 (t -test) 以及相关分析的方法讨论土壤、植物因子的年间变化及其之间的关系. 使用变异系数 (coefficient of variation, $\text{CV} = \text{SD}/\text{mean}$) 来检验所选变量的可变性. 以上所用的统计分析都是采用 SPSS 13.0 完成,而回归分析和作图功能在 Origin 8.0 上实现. 利用以时间为协变量的偏相关分析 (partial RDA, CANOCO 4.5) 进一步探讨土壤、植物因子之间的关系.

2 结果与分析

2.1 土壤因子

所选样地土壤 pH 呈微碱性,2 a 平均 7.53. 所选样地土壤 pH 和土壤全磷较为稳定 ($\text{CV} < 0.04$), 土壤全氮及有机 C 变化程度次之,而土壤净氮硝化速率及氮矿化速率变化剧烈 ($\text{CV} > 0.3$, 表 1). 其中,2008 年、2009 年矿化速率范围分别为 $-37.74 \sim 121.85 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $-9.35 \sim 120.62 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 硝化速率范围分别为 $33.43 \sim 164.23 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $35.09 \sim 157.63 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. t 检验结果表明,土壤 pH、全氮、有机 C、土壤净氮矿化、硝化速率年间差异均不显著.

2.2 物种组成

2008 年、2009 年调查样方 ($0.5 \times 0.5 \text{ m}$) 的物种数范围分别为 28 ~ 45 和 30 ~ 39; 各调查样方均存在豆科植物,豆科物种数范围为 2 ~ 5 (未列出). 地上生物量变化较大(表 1),2008 年、2009 年变化范围分别为 $119.77 \sim 240.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $98.01 \sim 225.81 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. t 检验结果显示,物种数、地上生物量年间差异不显著 ($P > 0.05$).

表 1 2008 年、2009 年所选样地土壤因子、物种数以及生物量¹⁾ (mean ± SD, CVs)

项目	2008 年	2009 年
pH	7.55 (0.27, 0.03)	7.51 (0.18, 0.01)
硝化速率/ $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	101.7 (35.27, 0.35)	106.38 (42.66, 0.40)
矿化速率/ $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	77.75 (49.92, 1.18)	82.02 (44.11, 0.54)
土壤全氮/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	3.06 (0.48, 0.09)	2.98 (0.55, 0.15)
土壤全磷/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.64 (0.02, 0.03)	0.66 (0.02, 0.03)
土壤有机 C/%	2.99 (0.40, 0.05)	2.55 (0.41, 0.12)
物种数	35.08 (4.86, 0.14)	35.33 (3.17, 0.09)
生物量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	188.27 (33.78, 0.18)	180.27 (39.83, 0.22)

1) 各土壤因子年间差异均不显著

2.3 植物 N:P 化学计量特征

群落中不同功能群植物的 N:P 化学计量特征存在显著差异. 豆科氮含量、N:P 比均显著高于非豆

科植物,而杂草磷含量显著高于豆科和禾草(表 2). 禾草的氮含量、磷含量以及 N:P 比最低,除了禾草和杂草的氮含量,都达到了显著水平(表 2). 2008

表 2 2008 年、2009 年禾草、杂草以及豆科植物氮、磷含量及 N:P 比值¹⁾ (mean ± SD)
 Table 2 Aboveground N, P concentrations and N:P ratios (mean ± SD) of forbs, graminoids and legumes in the studied area in 2008 (n = 24) and 2009 (n = 12)

项目	2008 年			2009 年		
	氮含量 /mg·g ⁻¹	磷含量 /mg·g ⁻¹	N:P 比	氮含量 /mg·g ⁻¹	磷含量 /mg·g ⁻¹	N:P 比
禾草	14.61a (2.57)	1.55a (0.22)	9.53a (1.88)	10.63a (2.45)	1.17a (0.16)	8.52a (1.73)
杂草	18.44b (3.58)	1.88b (0.29)	9.94a (2.04)	18.08b (3.23)	1.93b (0.36)	10.09a (2.42)
豆科	30.46c (3.46)	1.63a (0.26)	19.05b (2.94)	29.50c (4.64)	1.68b (0.20)	17.84b (2.49)

1) 不同字母表示方差分析多重比较结果差异显著

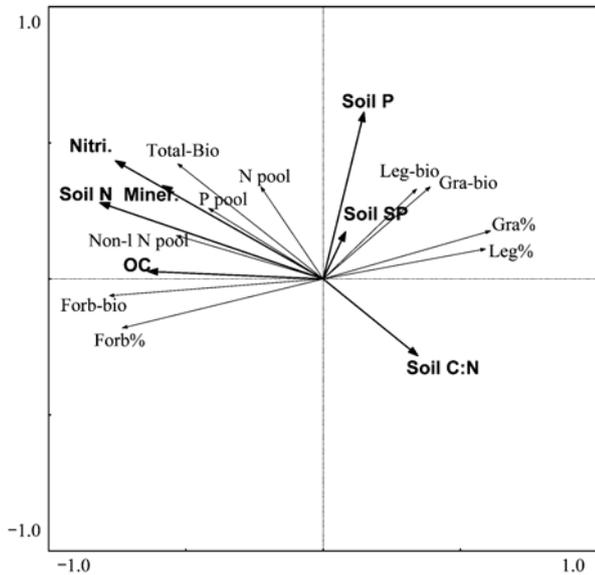
年、2009 年平均群落 N:P 比分别为 9.83 和 11.57.

2.4 土壤因子与植被特征的关系

partial-RDA 分析结果对变量的解释量达到 48.8%, 其中前两轴分别解释 38.6% 和 8.1% (图 2). 各功能群的生物量及生物量比例与第一轴显著相关. 地上生物量、杂草生物量、杂草比例与土壤有机 C(OC)、全氮(Soil N)、净矿化速率(Miner.) 以及净硝化速率(Nitri.) 显著正相关, 而与土壤 C:N

比负相关; 而豆科、禾草生物量及其比例与土壤因子的关系与杂草相反. 除了土壤全磷及速效磷外, 土壤各因子与非豆科地上氮库、地上总氮库显著相关(图 2).

2008、2009 年的线性回归结果显示, 群落 N:P 比、非豆科植物 N:P 比均与豆科生物量比例呈显著地正相关关系(图 3).



加粗箭头及黑体字为土壤因子; 细箭头及白体字为地上植物特征. Soil N: 土壤全氮; Miner.: 净氮矿化速率; Nitri.: 净氮硝化速率; OC: 土壤有机碳; Soil P: 土壤全磷含量; Soil SP: 土壤速效磷含量; Soil C:N: 土壤 C:N 比; Total-Bio: 地上群落总生物量; Forb-bio: 杂草生物量; Gra-bio: 禾草生物量; Leg-bio: 豆科生物量; Forb%: 杂草生物量比例; Gra%: 禾草生物量比例; Leg%: 豆科生物量比例; N pool: 地上群落氮库; Non-l N pool: 非豆科地上氮库; P pool: 地上群落磷库

图 2 以年为协变量、植物-土壤因子的 partial-RDA 双序图
 Fig. 2 Relationship of soil factors and aboveground characteristics biplot of partial redundancy analysis (RDA) with year as covariable

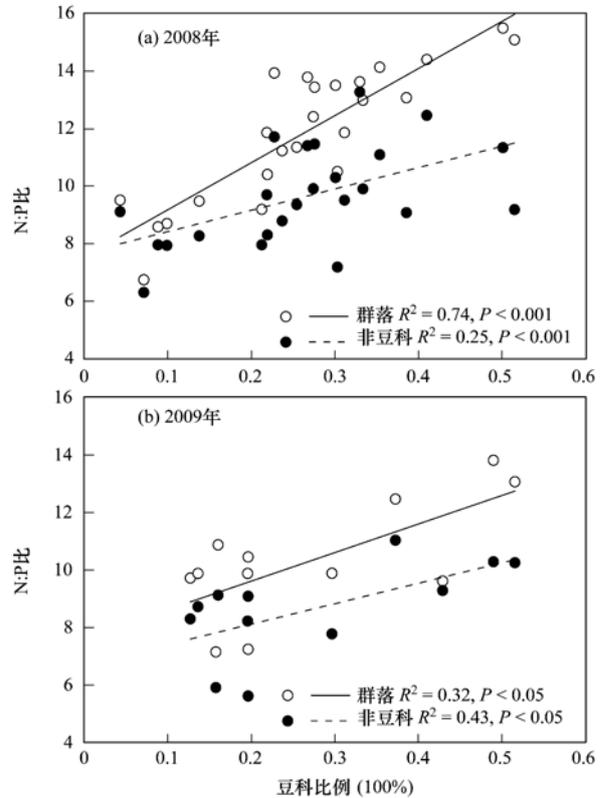


图 3 2008 年、2009 年豆科生物量比例与群落、非豆科植物 N:P 比的回归关系

Fig. 3 Positive relationships between percentages of legumes versus N:P ratios for the whole community and non-legumes in 2008 and in 2009

3 讨论

3.1 土壤因子与地上生物量

作为氮进入群落的重要途径,氮矿化过程往往促进地上生物量及群落氮库的积累^[4, 5]。其中硝化速率也能很好地表征土壤氮的可利用性(图2),在生态学研究常用作判断土壤氮潜在肥力的标准^[5]。土壤硝化速率反映了在一定时期内土壤向植物提供硝态氮的总量,对高山植被群落生产力的保持具有重要的意义^[4]。青藏高原亚高寒草甸的研究得到了类似的结果,群落地上生物量及地上氮库的积累与土壤氮矿化、硝化速率呈显著地正相关(图2)。

土壤氮矿化及硝化过程受到许多因素的影响,包括土壤全氮、有机质、含水量、土壤C:N比以及微生物活性等^[8]。作为矿化作用的基质,土壤全氮与土壤氮矿化、硝化作用往往正相关^[26],这在亚高寒草甸局域尺度研究上尤其显著(图2)。因此,在局域尺度上土壤全氮在一定程度上也能衡量土壤氮肥力,影响群落生产力,而这一影响对非豆科植物尤为显著。然而,Forana等^[5]认为,土壤总氮含量无法解释矿化速率的差异,也不能用来衡量土壤释放植物可利用氮的能力,因为土壤中大部分氮都以植物无法利用的形式存在^[27]。事实上,相对于土壤硝化速率、矿化速率以及群落地上生物量,土壤全氮含量样点间差异较小,其对土壤养分的指示作用缺乏说服力(表1)。

样点间群落生物量差异显著,年内最大生物量甚至超过最小生物量的两倍。样地分布虽然尺度较小,坡度、坡向、海拔大致相同,但土壤养分显著存在空间异质性,这可能是引起生物量差异的主要方面。研究表明,土壤养分的空间异质性对生物量差异的影响不仅可以在大尺度发生,也可以在小至1 m以内的局域尺度上产生作用^[4]。

不管豆科部分的氮库排除与否,土壤氮肥力与地上氮库显著正相关(图2)。对自然群落来说,其地上氮库主要由土壤可利用氮的供应水平所决定^[4, 5],而豆科植物的存在增加了额外的群落氮素来源,这对贫瘠土壤保持较高的氮库水平有着重要的作用。因此,土壤氮肥力对地上氮库的改变,主要通过非豆科植物起作用。

人为添加氮肥往往促进禾草类植物的生长,提高其在群落中的优势度,这在多种类型的植被上得到验证^[4, 28, 29]。相对其它草本植物,禾草植物普遍

具有发达的根系,能够快速而有效地吸收所添加的养分^[2, 23]。然而,施肥之后土壤养分的丰富是短暂的,土壤-植物的关系并非稳定的状态;而自然群落中植物经过长期的竞争与选择,对土壤资源的利用达到了相对平衡的状态。随着自然氮肥力的增加,亚高寒草甸禾草、豆科生物量比例下降,杂草比例上升(图2),这与人为添加氮素的效果相反^[4, 28, 29]。一般来说,低氮含量、低N:P比例的植物适应氮限制类型的土壤,而低磷含量、高N:P比例的植物是适应低磷环境^[23]的特征。与杂草及豆科植物相比较,禾草养分含量低,具有较高的养分利用效率;而豆科植物通过与固氮菌的互利共生获得额外的氮素,其氮素含量较高^[11, 30]。本研究也得到了相同的结果,青藏高原亚高寒草甸群落中禾草的氮、磷含量显著高于其它功能群,而豆科氮含量最高(表2)。禾草的高养分利用效率(低氮、磷含量)、豆科额外的氮素来源(固氮作用)增强了其在贫瘠土壤的竞争力,它们对保持贫瘠土壤群落生产力起着重要的作用。土壤氮肥力的改善,将增强杂草的优势度,从而引起杂草植物对豆科、禾草的替代过程(图2)。

3.2 植物N:P化学计量特征与氮状况

植物N:P比值反映了其所在环境的氮、磷养分状况,常作为判断植被氮、磷限制类型的指示器^[9, 10]。本研究中群落N:P比值两年平均为10.7,接近Güsewell^[9]提出的氮限制临界值($N:P < 10$),低于Tessier等^[10]提出的临界值($N:P < 14$),这说明该地区植被主要养分限制类型为氮限制。这与其他高山植被的施肥结果一致,氮素的添加能够显著增加高寒、亚高寒草甸植被的生物量^[3]。群落平均氮、磷含量均高于前人提出的植物氮、磷绝对含量判断植被限制类型的临界值^[12, 13],因此植物养分绝对含量不宜作为亚高寒草甸植被限制类型的判断依据。作为对极端环境的适应,高山植物需要更多的营养投入到特定防御组织来抵御环境胁迫而又保证碳(C)的同化过程的顺利进行^[30, 31],植物养分含量特别是氮、磷含量随着海拔升高显著增加^[4]。前期研究表明,青藏高原高寒草甸植物氮、磷含量高于全球平均水平^[8],N:P化学计量对养分限制类型的指示作用,其临界值的确定尚需进一步探讨。

由于生理学、形态学等方面的差异,群落中不同功能群植物的养分状况也存在差异^[9]。杂草和禾草的N:P比无显著差异,两年平均均低于临界值10,而豆科植物N:P比值大于临界值16(表2),说明非豆科植物的生长受到氮素供应的限制,而豆科植物

更易受到磷可用度的影响^[9, 10, 32]. 群落中不同功能群植物在氮素吸收利用机制上的差异,是群落获得最高产量的重要保障^[6, 18]. 在氮限制的植被上,豆科植物的存在对群落生物量及氮库的积累上起了重要的作用^[15].

通过氮素的草-豆循环等途径,豆科植物固定的氮素能够为非豆科植物所利用,从而改善群落中非豆科植物的氮素状况^[15]. 此外,通过增加根际微生物的活动,豆科植物的存在也能促进土壤氮矿化过程,从而提高群落的氮供应水平及地上生物量的积累^[5]. 本研究也获得了类似的结果,青藏高原亚高寒草甸群落中随着豆科比例的增加,不仅群落平均 N:P 比值升高,非豆科植物的 N:P 比也相应地上升(图 3).

4 结论

(1)在氮为主要养分限制因子的亚高寒草甸,豆科和禾草分别通过固氮作用和提高养分利用效率以提高其在群落中的竞争力.

(2)作为全球气候变暖的结果,氮沉降的增加将提高亚高寒草甸的杂草优势度.

(3)豆科植物的存在改善群落氮状况,包括减轻非豆科植物的氮限制水平.

致谢:本研究在采样过程中,由兰州大学高寒草甸与湿地生态系统定位研究站提供食宿及样品前处理条件,谨致谢忱.

参考文献:

- [1] He J S, Wang L, Flynn D F B, *et al.* Leaf nitrogen; phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, **155**(2): 301-310.
- [2] Lovelock C E, Feller I C, Ball M C, *et al.* Testing the growth rate vs. geochemical hypothesis for latitudinal variation in plant nutrients [J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(12): 1154-1163.
- [3] Dessureault-Rompré J, Zebarth B J, Georgallas A, *et al.* Temperature dependence of soil nitrogen mineralization rate: Comparison of mathematical models, reference temperatures and origin of the soils [J]. *Geoderma*, 2010, **157**(3-4): 97-108.
- [4] Körner C. *Alpine plant life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems* (2nd ed.) [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [5] Fornara D, Tilman D. Ecological mechanisms associated with the positive diversity-productivity relationship in an N-limited grassland [J]. *Ecology*, 2009, **90**(2): 408-418.
- [6] Dybzinski R, Fargione J E, Zak D R, *et al.* Soil fertility increases with plant species diversity in a long-term biodiversity experiment [J]. *Oecologia*, 2008, **158**(1): 85-93.
- [7] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* *Climate change 2001: The scientific basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [8] Zhang S H, Chen D D, Sun D S, *et al.* Impacts of altitude and position on the rates of soil nitrogen mineralization and nitrification in alpine meadows on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **48**(4): 393-400.
- [9] Güsewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.
- [10] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, **40**(3): 523-534.
- [11] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, *et al.* Assessing the generality of global leaf trait relationships [J]. *New Phytologist*, 2005, **166**(2): 485-496.
- [12] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2002, **5**(1): 37-61.
- [13] Wassen M J, Olde Venterink H G M, De Swart Evalyne O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1995, **6**(1): 5-16.
- [14] Spehn E M, Joshi J, Schmid B, *et al.* Above-ground resource use increases with plant species richness in experimental grassland ecosystems [J]. *Functional Ecology*, 2000, **14**(3): 326-337.
- [15] Spehn E M, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, *et al.* The role of legumes as a component of biodiversity in a cross-European study of grassland biomass nitrogen [J]. *Oikos*, 2002, **98**(2): 205-218.
- [16] Voisin A-S, Salon C, Munier-Jolain N G, *et al.* Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2002, **242**(2): 251-262.
- [17] Wright I J, Reich P, Westoby M, *et al.* The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, **428**(6985): 821-827.
- [18] Roscher C, Thein S, Schmid B, *et al.* Complementary nitrogen use among potentially dominant species in a biodiversity experiment varies between two years [J]. *Journal of Ecology*, 2008, **96**(3): 477-488.
- [19] Scherer-Lorenzen M, Palmberg C, Prinz A, *et al.* The role of plant diversity and composition for nitrate leaching in grasslands [J]. *Ecology*, 2003, **84**(6): 1539-1552.
- [20] Frank D A. Ungulate and topographic control of nitrogen; phosphorus stoichiometry in a temperate grassland; soils, plants and mineralization rates [J]. *Oikos*, 2008, **117**(4): 591-601.
- [21] Reich P B, Buschena C, Tjoelker M, *et al.* Variation in growth rate and ecophysiology among 34 grassland and savanna species

- under contrasting N supply: a test of functional group differences [J]. *New Phytologist*, 2003, **157**(3): 617-631.
- [22] Wilson S D, Tilman D. Quadratic variation in old-field species richness along gradients of disturbance and nitrogen [J]. *Ecology*, 2002, **83**(2): 492-504.
- [23] Tilman D. *Mechanisms of plant competition* [M]. Oxford: Blackwell Science, 1997.
- [24] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, *et al.* Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate [M]. Washington D. C.: Government Printing Office, 1954.
- [25] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988. 65-71.
- [26] Thamdrup B, Fleischer S. Temperature dependence of oxygen respiration, nitrogen mineralization, and nitrification in Arctic sediments[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, **15**(2): 191-199.
- [27] Sollins P, Swanston C, Kramer M. Stabilization and destabilization of soil organic matter-a new focus [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85**(1): 1-7.
- [28] Van Heerwaarden L M, Toet S, Aerts R. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency and proficiency in six sub-arctic bog species after 4 years of nitrogen fertilization[J]. *Journal of Ecology*, 2003, **91**(6): 1060-1070.
- [29] Falkengren-Grerup U. Nitrogen response of herbs and graminoids in experiments with simulated acid soil solution [J]. *Environmental Pollution*, 1998, **102**(1): 93-99.
- [30] He J S, Wang Z H, Wang X P, *et al.* A test of the generality of leaf trait relationships on the Tibetan Plateau [J]. *New Phytologist*, 2006, **170**(4): 835-848.
- [31] Onoda Y, Hikosaka K, Hirose T. Allocation of nitrogen to cell walls decreases photosynthetic nitrogen-use efficiency [J]. *Functional Ecology*, 2004, **18**(3): 419-425.
- [32] Jouany C, Cruz P, Petibon P, *et al.* Diagnosing phosphorus status of natural grassland in the presence of white clover[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, **21**(3): 273-285.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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