

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体景观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征

张海东¹, 汝海丽³, 焦峰^{1,2,3*}, 薛超玉¹, 郭美丽³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 研究草本植被群落生态化学计量学特征、营养元素分配及其变化规律对阐明草本植被群落对环境变化的响应和适应性具有重要意义。本文以延河流域 8 个不同退耕年限的草本植被群落叶片、根系及土壤为对象, 分别对其 C、N、P、K 化学计量学特征进行了研究。结果表明, 黄土丘陵区草本植被群落叶片 C、N、P、K 含量平均值分别为 444.21、22.34、1.49、14.66 mg·g⁻¹, C/N、C/P、C/K、N/P 平均值分别为 21.86、424.72、39.82、20.27; 根系 C、N、P、K 含量平均值分别为 285.16、5.79、0.27、6.07 mg·g⁻¹, C/N、C/P、C/K、N/P 平均值分别为 60.56、1 019.33、46.55、21.36; 土壤 C、N、P、K 含量平均值分别为 2.28、0.18、0.28、4.33 mg·g⁻¹, C/N、C/P、C/K、N/P 平均值分别为 16.43、8.40、0.54、0.66。在退耕 1~35 年间, 草本植被群落叶片 C 含量上升, N 含量先上升后下降, 磷含量整体下降, K 含量先下降后上升; 叶片 C/N、C/P、C/K、N/P 总体呈上升趋势。根系 C、N、P、K 含量及其特征的变化规律与叶片不尽相同。随着退耕年限的增加, 土壤 C、N 含量上升, P 含量呈反正弦函数状变化, K 含量呈抛物线状变化, C/N 下降, C/P、C/K、N/P 均上升。在退耕时间序列梯度上, C、P、K 在叶片和根系中含量的比值存在不同程度的下降趋势, C、N、P 在叶片和土壤中含量的比值下降, C、N 在根系和土壤中含量的比值下降。植物营养元素的限制状况及分配规律均与退耕恢复时间响应关系及程度均存在差异。

关键词: 退耕时间; 叶片; 根系; 土壤; 化学计量

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1128-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.044

C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau

ZHANG Hai-dong¹, RU Hai-li³, JIAO Feng^{1,2,3*}, XUE Chao-yu¹, GUO Mei-li³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: The research of plant ecological stoichiometry characteristics, nutrients distribution and their changes is of great significance to explain the response and adaptation of plants to environmental change. Leaves, root and soil from eight different abandoned years in Yanhe River basin were selected to study the content, characteristic ratio and distribution of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K). The results showed that the C, N, P, K contents of plant leaves were 444.21, 22.34, 1.49, 14.66 mg·g⁻¹ respectively, the C/N, C/P, C/K, N/P ratios of plant leaves were 21.86, 424.72, 39.82, 20.27 respectively; the C, N, P, K contents of root were 285.16, 5.79, 0.27, 6.07 mg·g⁻¹ respectively, the C/N, C/P, C/K, N/P ratios of root were 60.56, 1 019.33, 46.55, 21.36 respectively; the C, N, P, K contents of soil were 2.28, 0.18, 0.28, 4.33 mg·g⁻¹ respectively, the C/N, C/P, C/K, N/P ratios of soil were 16.43, 8.40, 0.54, 0.66 respectively. During the abandoned year of 1-35, C content of leaves increased, N content increased and then declined, P content declined overall, K content declined and then increased. The C/N, C/P, C/K, N/P ratios of plant leaves showed a rising trend overall. The changing pattern of root was different from that of leaves. Along with the increasing rehabilitation age, C and N contents of soil increased, P content changed as arc-sin function, K content changed as parabola, C/N decreased, C/P, C/K, N/P increased. With the increase of Abandoned Years, the ratio of C, P, K contents in leaves and root decreased, the ratio of C, N, P contents in leaves and soil decreased, the ratio of C, N contents in root and soil decreased. Corresponding relationship and its intension between different abandoned years and plant nutrient limit status and its allocation pattern were different.

Key words: rehabilitation time; leaves; root; soil; stoichiometry

收稿日期: 2015-07-03; 修订日期: 2015-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271043, 31370455); 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 张海东(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为退耕地植被恢复及环境响应, E-mail: 632383942@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jiaof@nwsuaf.edu.cn

生态化学计量学主要研究多重化学元素的平衡及其与生态过程的相互影响,进而为分析植物的养分利用状况提供重要手段^[1~3]。植物有保持自身元素组成稳定的能力,从而使得植物体内的营养元素处于一个动态平衡状态,植物体内主要元素的含量、分布和生态化学计量学特征变化反映了植物响应和适应环境条件变化的本质,研究植物生态化学计量学特征及变化规律对阐明植物对环境变化的响应和适应性具有重要意义^[4~7]。植物体营养元素含量及其分配与自身结构特点及生长规律有关,同时也受环境因素的制约^[8],这是物种系统发育和环境因素共同作用的结果^[9]。因此,研究植物叶片、根系和土壤的化学计量学特征对于分析生态系统的稳定性和植物养分限制状况、提出植物对环境的适应策略等方面具有重要意义。

退耕地植被恢复是一个长期而复杂的过程,期间伴随着气候变化、群落自然演替而导致的物种类型和结构变化、土壤结构和养分的变化等^[10~13]。自 Elser 等^[14]明确提出生态化学计量学的概念以来,有关生态系统 C、N、P 元素的研究逐渐展开^[15],近年来在国内发展迅速。目前国内对于生态化学计量学的研究大多针对植物叶片,主要涉及植物不同演替阶段、不同群落类型、不同干预方式等,其中针对植物叶片中的 N、P 与 N/P 的化学计量学特征的研究最为广泛^[16~20]。钾元素主要集中在植物最活跃的部位,对重要反应的酶有活化作用,对碳水化合物的合成运输也有影响,然而作为植物生长必须的 3 种大量营养元素之一,却在上述研究中极少被提及。在黄土丘陵区,退耕地的植被恢复是治理该区水土流失和生态环境的根本措施,该区土壤理化性状较差,退耕地的自然恢复相对缓慢^[21~23],从植物与土壤的 C、N、P、K 含量及特征比入手研究,来考察化学计量特征与退耕恢复时间

的耦合关系对于该区植被恢复具有重要的指导意义和参考价值。退耕地草本植被叶片、根系及土壤的 C、N、P、K 含量、特征比以及营养元素在叶片、根系及土壤间的分配规律究竟如何?在退耕序列梯度下又如何变化?本文以黄土丘陵区纸坊沟流域为研究区,在退耕时间序列梯度上对退耕地进行草本植被群落及其土壤环境进行调查研究,探讨黄土丘陵区植物叶片、根系及土壤 C、N、P、K 化学计量特征沿时间梯度的变化规律,以期预测黄土丘陵区植被恢复过程中植物营养元素的变化规律和限制情况提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样地信息

研究区位于延河流域内,36°11′37.5″~36°45′38.9″N,109°14′47.6″~109°18′49.4″E,属半干旱气候区,平均海拔为1 218 m,年平均气温为9.0℃,年平均蒸发量为1 000 mm,流域多年平均降水量为506 mm,降雨年内分配不均,多集中发生在7~9月,且多暴雨。延河流域属于黄土丘陵沟壑区第二副区,地形破碎,主要土壤类型为黄土母质上发育而来的黄绵土,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重,生态环境脆弱。开始生态恢复后,形成不同演替阶段的植物群落,多以禾本科(Gramineae)、菊科(Asteraceae)以及豆科(Fabaceae)植物为主。研究区(表1)主要代表植物有狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries* Thunb)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb)、芨蒿(*Artemisia giraldii* Pamp)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)等。

表1 样地基本情况¹⁾

Table 1 General information of sampling sites

恢复年限/a	坡度/(°)			海拔/m			群落类型	主要伴生物种
	1	2	3	1	2	3		
1	15	18	21	1224	1236	1252	狗尾草	鹅观草、硬质早熟禾
5	27	22	24	1271	1254	1260	茵陈蒿	鹅观草、狗尾草
10	25	25	22	1230	1236	1217	猪毛蒿	茵陈蒿、狗尾草
15	29	25	24	1251	1270	1264	白羊草	长芒草、达乌里胡枝子
20	10	18	24	1198	1202	1194	铁杆蒿	芨蒿、阴行草
25	20	18	23	1145	1172	1193	长芒草	铁杆蒿、达乌里胡枝子
30	27	20	24	1228	1210	1218	铁杆蒿	长芒草、败酱草
35	23	23	25	1216	1244	1226	铁杆蒿	白羊草、草木樨状黄芪

1) 鹅观草(*Roegneria kamoji* Ohwi)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes* Trin)、阴行草(*Siphonostegia chinensis* Benth)、败酱草(*Thlaspi arvense* Linn)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides* Pall)

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理

采样时间为2014年8月中旬,对8个不同恢复年限退耕地进行植物叶片、根系和土壤样品进行采集,每个恢复年限重复采样3次。每个样地随机选择3个1 m×1 m的样方,对样方内所有物种进行叶片样品采集,选择样方内所有物种植株顶部健康、完整的叶片,装入信封,带回室内烘干、研磨,过100目筛备用。由此采集并制备的植物叶片样本共计170个。每个样地按照“蛇形”法各选择5个样点进行植物根系样品采集,用内径9 cm的土钻分0~20、20~50、50~80、80~100 cm 4层将植物根系连土取出,并分层装袋。采用水洗的方法将植物根系和土壤分离,并烘干、研磨、过筛备用。由此采集并制备的植物根系样品共计160个。每个样地按照“蛇形”法各选择5个样点进行土壤样品采集,用内径3.5 cm的土钻分0~20、20~50、50~80、80~100 cm 4层采集土壤样品,并分层装袋带回室内。将采集的土壤样品风干后研磨,过筛。

1.2.2 实验测定

用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法制备用于测定植物叶片、根系样品全氮、全磷、全钾的待测液,用连续流动化学分析仪(AutoAnalyzer3)测定样品全氮、采用钼黄比色法测定样品全磷、用火焰光度计测定样品全钾,用重铬酸钾外加热法测定有机质。土壤全氮经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{:CuSO}_4\text{:Se}$ 催化后用全自动凯氏定氮仪(ATN-300)测定,土壤全P采用钼锑抗比色法测定,土壤全K采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量外加热法测定。

1.2.3 数据处理与分析

不同恢复年限退耕地草本植被群落叶片C、N、P、K含量及其特征比是以物种重要值为权重因子的加权平均值,重要值的计算公式为:重要值=(相对生物量+相对频度+相对盖度)/3;根系C、N、P、K含量及其特征比是以0~20、20~50、50~80、80~100 cm 4层植物根系生物量为权重因子的加权平均值;土壤C、N、P、K含量及其特征比采用的

是4个土层的算术平均值。利用Excel进行数据录入与整理,采用SPSS软件对数据进行统计分析、相关性分析以及差异显著性分析,用Sigmaplot和Excel作图。

2 结果与分析

2.1 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落叶片C、N、P、K化学计量特征

黄土丘陵区退耕地草本植被群落叶片C、N、P、K含量平均值分别为444.21、22.34、1.49、14.66 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, C/N、C/P、C/K、N/P平均值分别为21.86、424.72、39.82、20.27。叶片N、P含量显著正相关($P<0.05$),叶片C/P与C/K显著正相关($P<0.05$),叶片C/N与N/P极显著正相关($P<0.01$)。在退耕1~35年间,叶片C含量总体呈上升趋势;叶片N含量表现为先上升后下降趋势,拐点在20年,变化范围在20.89~27.60 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间;叶片P含量在1~20年间波动性强,之后趋于稳定,总体呈下降趋势,其显著性不强($P>0.05$);叶片K含量表现为先下降后上升趋势,拐点在15年处。在退耕1~35年间,叶片C/N呈先下降后上升趋势;叶片C/P呈上升趋势;叶片C/K和N/P表现为先上升后下降趋势,拐点分别在15年和20年处(图1)。

2.2 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落根系C、N、P、K化学计量特征

黄土丘陵区退耕地草本植被群落根系C、N、P、K含量平均值分别为285.16、5.79、0.27、6.07 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, C/N、C/P、C/K、N/P平均值分别为60.56、1019.33、46.55、21.36。根系C、N含量极显著负相关($P<0.01$),根系C、P含量极显著正相关($P<0.01$)。不同土层根系C含量为中等变异程度,N、P、K含量为弱变异程度。根系C含量在50~80 cm最高,N含量在80~100 cm处最高;根系P、K含量均在80~100 cm处最低。根系C含量在0~20 cm与50~80 cm土层处差异性显著($P<0.05$),根系N、K含量在不同土层均无显著差异(表2)。

表2 不同土层深度根系C、N、P、K含量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Concentrations of root C, N, P, K in different soil depth/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

元素	土层深度/cm				标准差	变异系数/%
	0~20	20~50	50~80	80~100		
C	242.40a	318.39b	339.44b	301.09b	41.68	13.88
N	5.49a	5.80a	6.02a	6.79a	0.56	9.22
P	0.26a	0.29b	0.29b	0.31c	0.02	7.17
K	6.16a	6.03a	6.14a	5.70a	0.21	3.54

1) 小写字母不同代表在0.05水平上差异显著

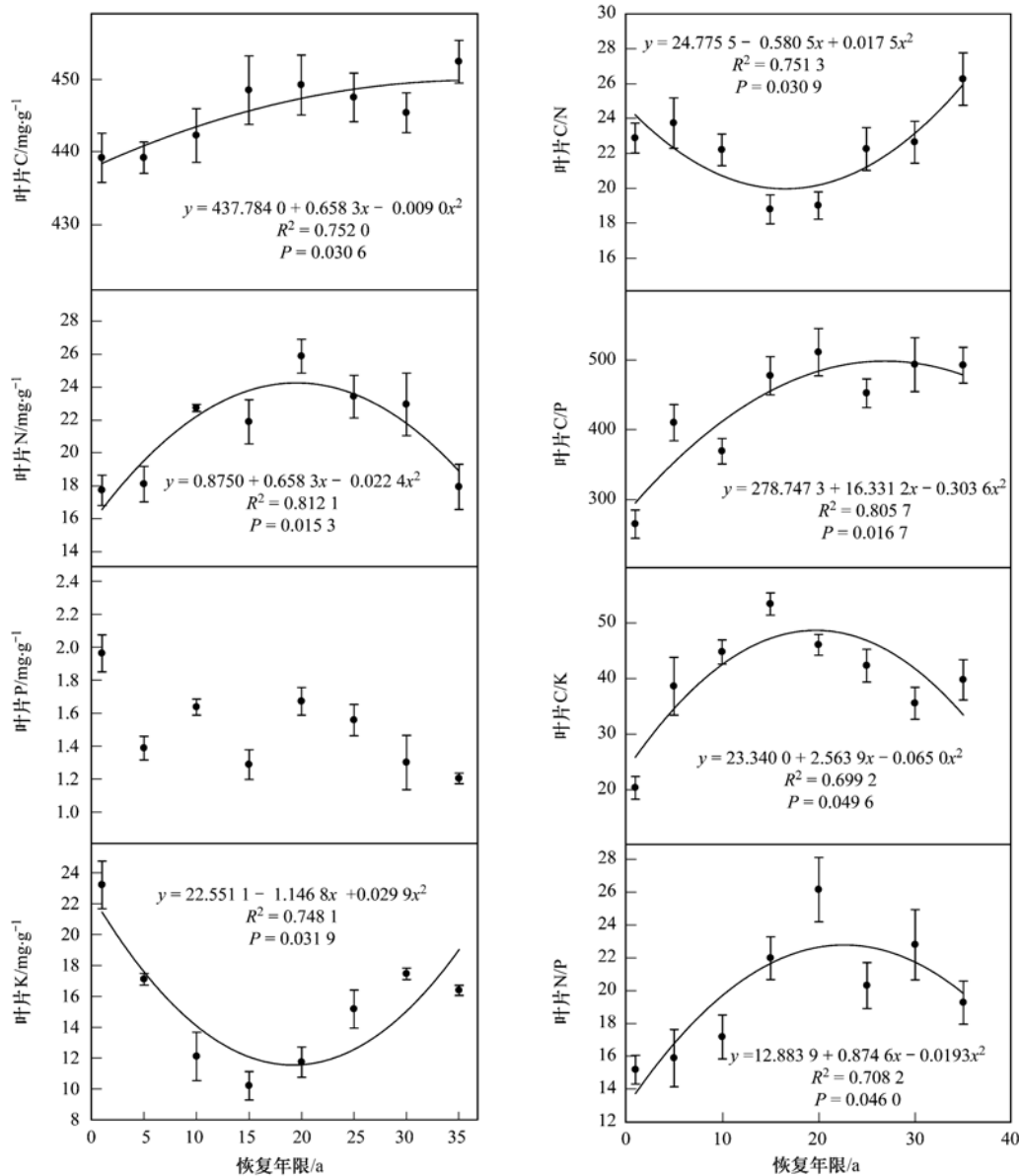


图 1 植物叶片化学计量学特征随时间梯度的变化规律

Fig. 1 Variation of leaf stoichiometry characteristics along the time gradient

如图 2 所示,根系 C 含量在 1~10 a 迅速上升随后波动性下降,到退耕 35 a 下降至 $263 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; N 含量在 1~10 年迅速下降而后缓慢回升; P 含量波动性上升; K 含量波动性较强,总体呈先下降后上升趋势,其显著性不强 ($P > 0.05$). 在退耕 1~35 年间,植物根系 C/N 先下降后回升; C/P 在随退耕年限增加而下降; C/K 总体先上升后下降,最大值在 25 年处;根系 N/P 在 1~10 年迅速下降,而后缓慢回升.

2.3 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落土壤 C、N、P、K 化学计量特征

黄土丘陵区退耕地草本植被群落土壤 C、N、

P、K 含量平均值分别为 2.28、0.18、0.28、4.33 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, C/N、C/P、C/K、N/P 平均值分别为 16.43、8.40、0.54、0.66. 相关分析表明,土壤 C、N 含量极显著正相关 ($P < 0.01$). 不同土层深度土壤 C、N 含量为中等变异程度, P、K 含量为弱变异程度. 表层土壤 (0~20 cm) C、N 含量显著高于与其他土层 ($P < 0.05$), 具有明显的表聚性 (表 3), 且随着退耕年限的增加, 土壤 C、N 元素含量的表聚性越来越强 (图 3). 不同土层土壤 P、K 含量差异性不显著.

如图 3 所示,随着退耕年限增加,各土层土壤 C、N 含量上升;各土层土壤 P 含量在退耕 10 年内

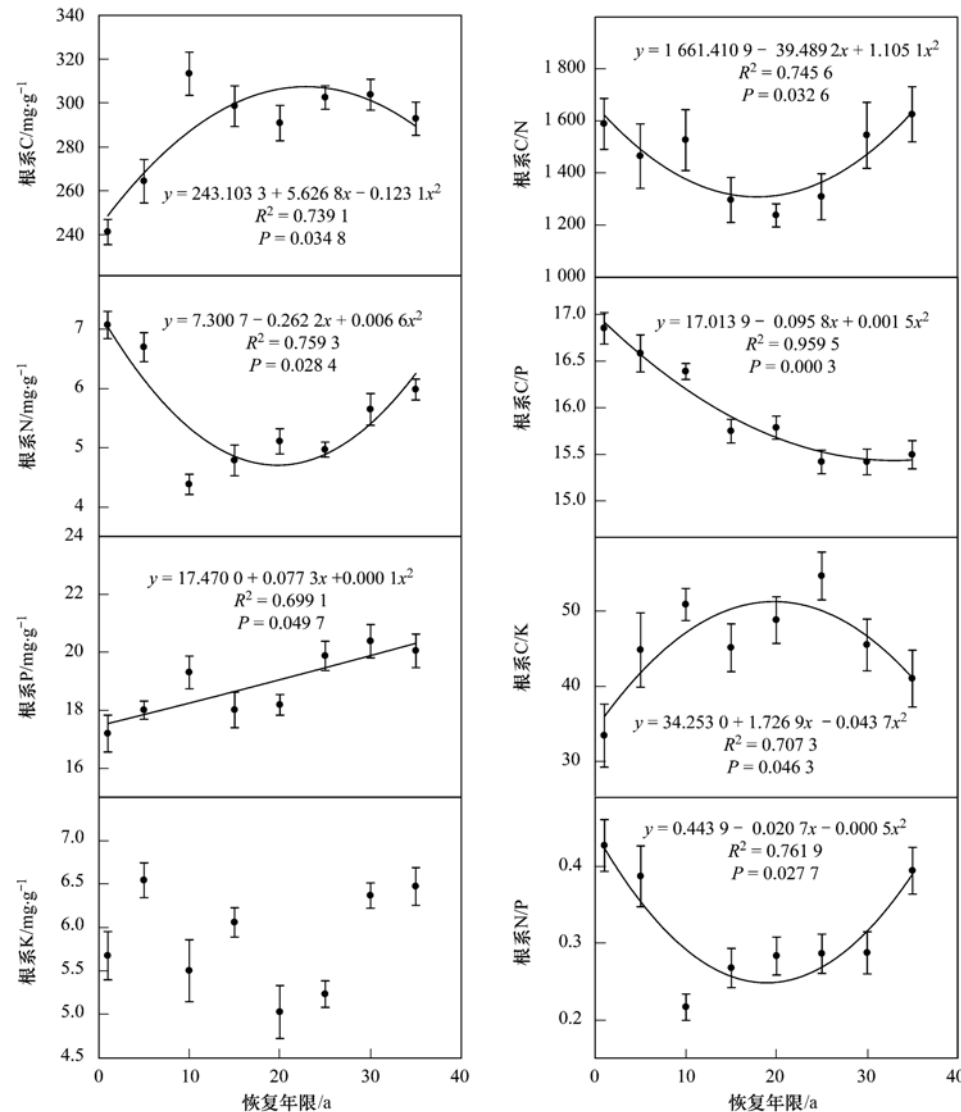


图 2 植物根系化学计量学特征随时间梯度的变化规律

Fig. 2 Variation of root stoichiometry characteristics along the time gradient

表 3 不同土层深度土壤 C、N、P、K 含量¹⁾/mg·g⁻¹

Table 3 Concentrations of soil C, N, P, K in different soil depth/mg·g⁻¹

元素	土层深度/cm				标准差	变异系数/%
	0~20	20~50	50~80	80~100		
C	3.77a	1.93b	1.67b	1.76b	1.00	43.86
N	0.32a	0.13b	0.15b	0.12b	0.10	52.34
P	0.27a	0.27a	0.28a	0.29a	0.01	2.90
K	4.47a	4.37a	4.25a	4.35a	0.09	2.04

1) 小写字母不同代表在 0.05 水平上差异显著

均有所下降,在 10~25 年内均有不同程度的回升,随后又开始下降;各土层土壤 K 含量均呈抛物线状变化趋势,顶点在退耕 20 年左右。在退耕 1~35 年间,植物土壤 C/N 先下降后上升,拐点在 20 年处;土壤 C/P 整体下降,在 35 年处偏高;C/K 总体先上升后下降,最大值在 25 年处;土壤 N/P 在 0~8 年迅速下降,而后缓慢回升。

2.4 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上 C、N、P、K 在草本植被群落与土壤间的分配规律

草本植被群落 C、N、P、K 元素在叶片和根系中含量比值的均值分别为 1.58、4.46、5.52、2.54,叶片的 C、N、P、K 元素含量均高于根系,其中 N、P 元素在叶片和根系间的差异大于 C、K 元素,C 元素含量在叶片和根系间差异最小。在退耕 1~35 年

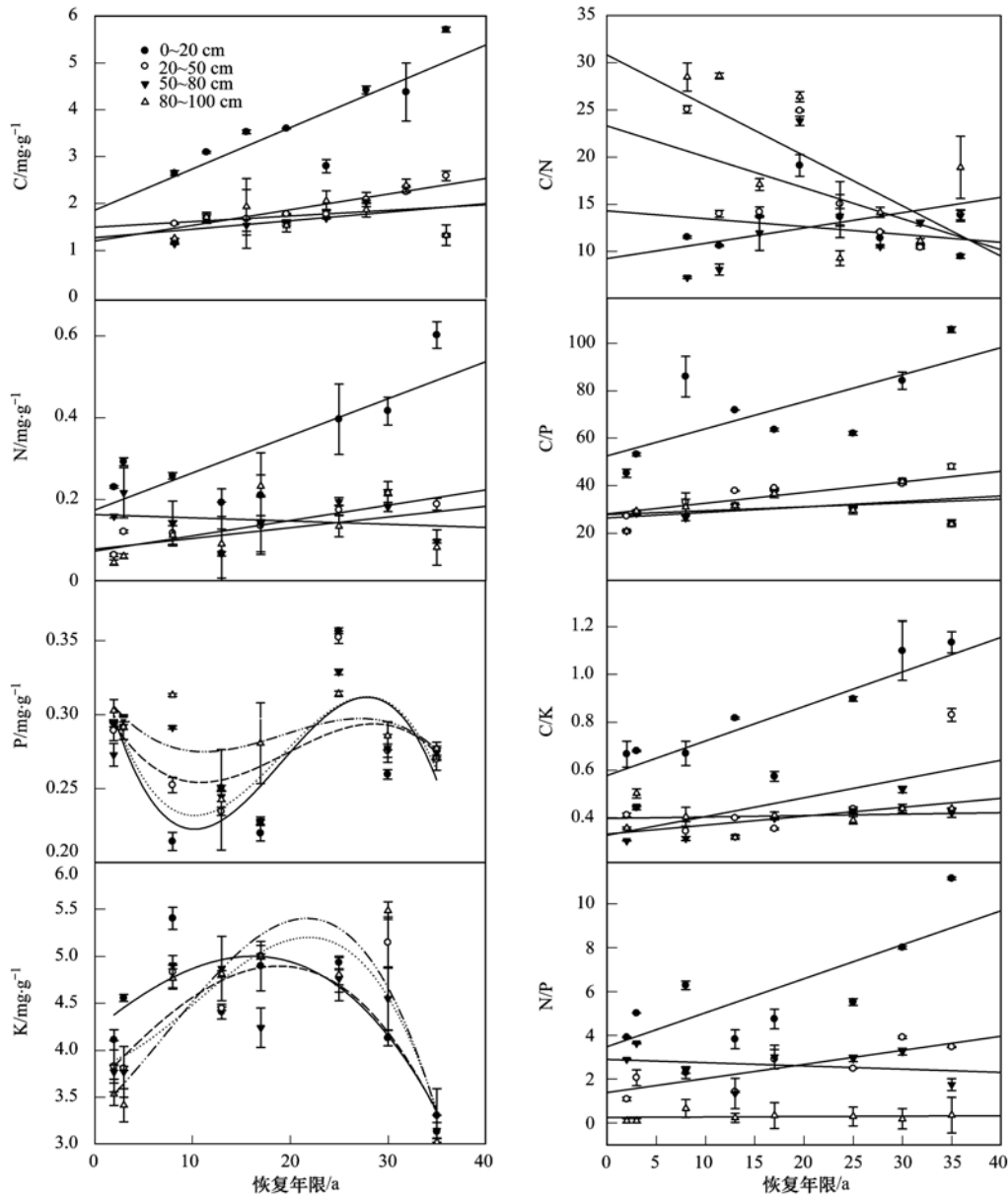


图3 不同土层深度土壤化学计量学特征随时间梯度的变化规律

Fig. 3 Variation of soil stoichiometry characteristics in different soil depth along the time gradient

间,C 在叶片和根系中含量的比值相对稳定; N 在叶片和根系中含量的比值先上升后下降, 拐点大约在退耕 20 年; P 在叶片和根系中含量的比值呈下降趋势; K 在叶片和根系中含量的比值呈趋势(图 4)。

草本植被群落 C、N、P、K 元素在叶片和土壤中含量比值的均值分别为 198、145、5.45、3.68, C、N、P、K 元素在根系和土壤中含量比值的均值分别为 126、33.5、1.00、1.50。C、N、P、K 元素含量在根系和土壤间的差异小于叶片和土壤间的差异。其中根系和土壤间 P、K 含量差异最小, 根系 P 含量与土壤接近, 根系 K 含量略高于土壤。在退耕

1~35 年间,C、N、P、K 元素在叶片和土壤中含量的比值呈不同程度的下降趋势; C、N 元素在根系和土壤中含量的比值呈下降趋势,P 元素在根系和土壤中含量的比值波动性变化,K 元素在根系和土壤中含量的比值先下降后上升(图 5 和图 6)。

3 讨论

3.1 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落叶片 C、N、P、K 化学计量特征

黄土丘陵区退耕地草本植被群落叶片 C 含量低于全球平均水平($464 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 高于阿拉善荒漠地区($379 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$); 叶片 N 含量略高于全球平均水

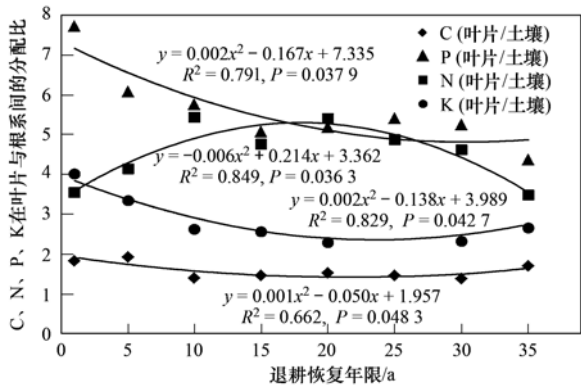


图4 C、N、P、K在叶片与根系间的分配比
随时间梯度的变化规律

Fig. 4 Variation of the ratio of leaf and root C, N, P, K
content along the time gradient

平,远高于阿拉善荒漠和内蒙古草地,可见该区植物叶片N含量处于较高水平;叶片P含量低于全球平均水平,高于阿拉善荒漠、内蒙古草地及松嫩草地。

黄土丘陵区退耕地草本植被群落叶片C/N与黄土高原地区平均水平相当,与全球平均水平接近;黄土丘陵区退耕地草本植被群落叶片C/P高于黄土高原平均水平和全球平均水平;由此可见,黄土丘陵区植物生长受P限制的程度强于受N限制。黄土丘陵区退耕地草本植被群落叶片N/P高于黄土高原地区平均水平,略高于内蒙古草地远高于阿拉善荒漠、松嫩草地以及全球平均水平。N/P通常被用来作为描述N和P相对限制的一个指标,一般情况下,当 $N/P < 14$ 时,群落水平上的植物生长主要受N限制;当 $N/P > 16$ 时,植物生长主要受P限制;当 $14 < N/P < 16$ 时,则植物生长同时受N、P两者的限制或者均不缺少^[24]。全球植物生长受N限制的情况较为普遍,阿拉善荒漠和松嫩草地植物生长主要受N限制,黄土高原地区植物生长普遍受N、P共同限制,而黄土丘陵区退耕地和内蒙古草地植物生长主要受P限制(表4)。

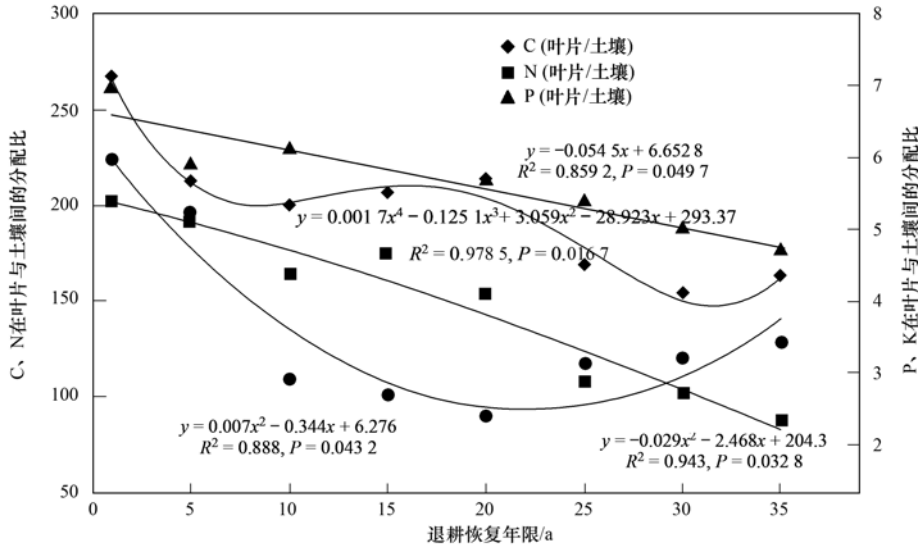


图5 C、N、P、K在叶片和土壤间的分配比随时间梯度的变化规律

Fig. 5 Variation of the ratio of leaf and soil C, N, P, K content along the time gradient

表4 黄土丘陵区植物叶片C、N、P、K含量与其他研究结果的比较

Table 4 Comparisons of C, N, P, K contents in plant leaves of Loess Hilly Region and results of other studies

研究区域	叶片含量/mg·g ⁻¹				C/N	C/P	C/K	N/P	文献
	C	N	P	K					
黄土丘陵区	444	22.3	1.49	14.7	21.9	425	39.8	20.3	本研究
黄土高原	438	24.1	1.60	16.7	21.2	312		15.4	[25]
阿拉善荒漠	379	10.7	1.04		66.7	683		11.5	[26]
内蒙古草地		17.2	1.10					18.1	[6]
松嫩草地		24.2	0.96					13.0	[7]
全球	464	20.6	1.99		21.2	312		11.8	[27]

在黄土丘陵区,随着退耕恢复年限的增加,C含量总体呈上升趋势,说明植物固C能力增强;N含

量表现为先上升后下降,说明植物生长受N限制逐渐增强;叶片P含量呈下降趋势,说明在黄土丘陵

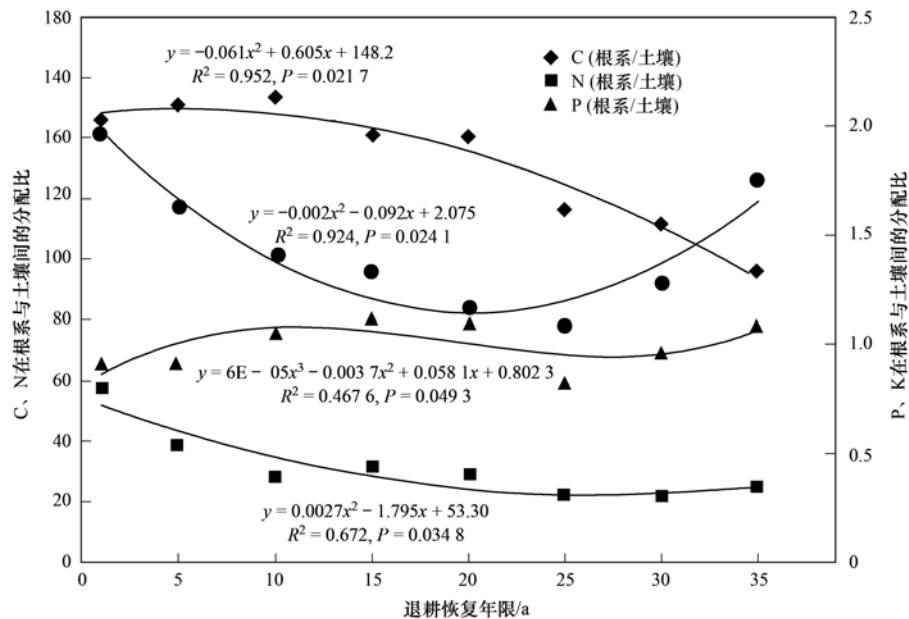


图6 C、N、P、K在根系和土壤间的分配比随时间梯度的变化规律

Fig. 6 Variation of the ratio of root and soil C, N, P, K content along the time gradient

区退耕地植被自然恢复过程中P供应不足,P对植物生长的限制作用日益增强;在退耕1~10年,叶片K含量迅速下降,主要是因为退耕后不再施肥,而弃耕后植被自然生长旺盛,土壤K迅速被消耗而造成供不应求的状况,随后逐渐恢复,说明K对植物生长的限制作用逐渐减弱,这一现象在叶片C/K的变化规律中也有所体现.随着恢复年限的增加,叶片C/N、C/P总体上升趋势,植物生长受N、P限制逐渐增强,尤其是受P的限制作用.叶片N/P在退耕20年内迅速上升(比值由15升至26),最后回落至19,由此可见,在退耕年内,植物生长由N、P共同限制迅速转变为主要受P限制,随后受P限制的程度有所减弱.由此可见,在退耕35年内,植物生长同时受N、P、K元素限制,随着恢复年限的增加,3种元素的限制作用强度处于动态变化之中,因此在采取人工恢复或干预措施时,应结合不同恢复年限植物生长的养分限制状况选择最优方案.

3.2 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落根系C、N、P、K化学计量特征

王娟等在关于子午岭辽东栎林C含量与C储量的研究中发现,不同林龄乔木叶、根的C含量变化范围分别为44.67%~46.36%、38.93%~41.10%,不同林龄林下灌木层叶、根的C含量变化范围分别为46.26%~44.39%、28.06%~40.13%,C含量均表现为叶>根^[28].本研究表明,黄土丘陵区退耕地植物根系C含量平均值为285

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,即28.5%,低于该区植物叶片C含量.与辽东栎林相比,本研究草本植被群落根系C含量低于乔木根系C含量的最低值,略高于林下灌木根系C含量的最低值.施宇等在研究黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状中发现,根N含量均值为0.941%^[29],本研究中根N含量为5.79 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,即0.579%.前者采样点涉及森林区、森林草原区和草原区,可见草本植被群落根系N含量相对较低.本研究根P含量为0.27 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,低于刺槐细根含P量^[30],高于铁杆蒿根系含P量^[31],可见,群落演替阶段越高级,根系含P量越高.

随着退耕恢复年限的增加,植物根系C、K含量变化规律与叶片类似,而N、P变化趋势相反.与叶片不同,根系尤其自身相对独立的对环境的响应机制,对植物体而言,叶片和根系之间也存在着养分的分配和响应关系,因此N、P在叶片与根系中含量与退耕时间存在相反的耦合关系可能是由于植物体养分分配规律所致.根系C/N和C/P表现出一致的变化规律,说明在退耕地植被恢复过程中N、P元素与C存在同步的配比机制,而K元素与C的配比则不同.根系N/P与叶片N/P整体变化趋势相反,也应归因于植物叶片和根系之间也存在着养分的分配和响应关系.

3.3 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落土壤C、N、P、K化学计量特征

土壤C主要来自土壤有机质和凋落物的分解,

土壤 N 主要源自有机质和大气氮沉降. 因此, 土壤 C、N 含量主要与生物因素相关, 且耦合性好, 空间分布基本一致. 土壤 P、K 主要来源于含 K、含 P 矿物的风化作用. 长白山森林不同演替阶段土壤 N 含量范围为 $2.118 \sim 3.158 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 土壤 P 含量范围为 $0.544 \sim 0.978 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 高寒地区原生蒿草草甸、轻度退化草甸、沙化草甸土壤 C 含量分别为 1.24、16.39、26.29 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, N 含量分为 0.18、1.44、2.24 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, P 含量分别为 0.33、0.48、0.71 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, K 含量分别为 10.70、15.70、17.12 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 内蒙古草地土壤 P 含量平均值为 0.33 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与沙化草甸相当. 沙化草甸与轻度退化草甸和原生草甸土壤 C、N 含量差异极大, 而 N、P 含量差异较小, 这与土壤 C、N、P、K 的来源的差异有关. 本研究表明, 黄土丘陵区土壤 C、N、P、K 含量平均值分别为 2.28、0.18、0.28、4.33 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 可见, 黄土丘陵区土壤 C 含量略高于沙化草甸, N 含量与沙化草甸相当、P、含量低于沙化草甸和内蒙古草地, K 含量低于沙化草甸. 总体而言, 黄土丘陵区土壤 C、N、P、K 的含量相对较低.

全球平均土壤 C/N 约为 13.33^[32], 土壤 C/N 变化范围为 9.9 ~ 29.8, 最大值和最小值分别出现在荒漠土壤和有机土土壤, 不同植被类土壤 C/N 也存在差异, 从森林的 13 上升到退化草地的 17^[33]. 高寒地区沙化草甸、轻度退化草甸、原生蒿草草甸土壤 C/N 分别为 6.73、11.36、11.71, C/P 分别为 3.78、36.32、36.86, C/K 分别为 0.12、1.05、1.54, N/P 分别为 0.56、3.02、3.15; 长白山森林不同演替阶段土壤 N/P 范围为 3.374 ~ 4.822. 本研究表明, 黄土丘陵区土壤 C/N、C/P、C/K、N/P 平均值分别为 16、8.4、0.54、0.66. 由此可见, 黄土丘陵区土壤 C/N(16) 高于全球平均水平(13.33), 与退化草地 C/N(17) 接近,; 土壤 C/P、C/K 均高于沙化草甸, 远远低于轻度退化草甸和原生蒿草草甸; 不同退化程度高寒草甸土壤 N/P 均低于长白山不同演替阶段森林土壤, 黄土丘陵区土壤 N/P 略高于沙化草甸, 远低于轻度退化草甸、原生草甸和森林土壤.

随着退耕恢复年限的增加, 各土层土壤 C、N 含量的不断增加. 土壤 C、N 含量具有显著的表聚性, 且退耕年限越长, 表聚性越强, 表明表层植物生长、代谢越来越旺盛, 枯落物分解、有机质积累作用越来越强. 土壤 C/N 随退耕增加而逐渐下降, 可见土壤 C、N 结构也在不断改善^[34]. 土壤 C/P 波动

性很强主要是由于土壤 P 含量波动造成的. 随着退耕年限增加, 土壤 C/K 不断上升与土壤 C 含量上升有关, N/P 逐渐上升与土壤 N 含量上升有关.

3.4 退耕时间序列梯度上 C、N、P、K 在植物叶片、根系及土壤间的分配规律

C 是构成有机化合物的基础, 而有机化合物约占植物体干物质的 90%, 因此 C 元素在植物体内含量较多, 在植物叶片及根系中均占有较高的比例. 黄土丘陵区草本植被群落叶片 C 含量高于根系 C 含量, 其比值相对稳定, 在退耕 1 ~ 35 年间变化不大. N 元素在植物生命活动中占有首要地位, 在退耕 1 ~ 35 年间, N 元素在叶片和根系中含量的比值呈先增加, 到 20 年处开始后减小的变化趋势, 可见在退耕 20 年之, 植物体 P 元素存在向叶片转移的趋势, 植物地上部分相对更为活跃. P 元素在新陈代谢、能量传递及贮存、C 水化合物的代谢、N 代谢等方面都有重要作用, 随着退耕年限的增加, P 元素在叶片和根系中含量的比值下降, 可见, 在黄土丘陵区植物生长受 P 限制的背景下, 植物体 P 元素存在向根系转移的趋势, 以优先满足根系正常的物质及能量代谢.

在退耕时间序列梯度上, C、N 元素的叶片与土壤含量比、根系与土壤含量比均存在不同程度的下降趋势, 主要源自土壤的养分累积. 群落中的 C 元素主要贮存于植物体内, 且含量相对稳定, 土壤中 C 含量相对较少, 但随着退耕年限的增加, 土壤 C、N 含量增长速率高于植物体, 也是土壤有机质含量增加, 土壤状况改良的表现. P 元素在叶片和土壤中含量的比值随退耕年限的增加而下降, 而 P 元素在根系和土壤中含量的比值变化不大, 可见根系中 P 元素含量与土壤同步性较强. K 元素由于其自身含量变异性较大, 在叶片、根系及土壤间的分配比变异性也相对较大. 其中 K 元素的叶片与根系含量比随退耕年限的增加略有下降, 表明随着退耕年限的增加, 根系的物质与能量代谢活动越来越强, 这一点与由 P 元素的分配规律所得的结论相一致. 在退耕时间序列梯度上, K 元素在植物体不同器官中的含量与在土壤中的含量比变化趋势一致, 均表现为先下降后回升.

4 结论

(1) 在退耕 1 ~ 35 年内, 随着退耕时间的增加, 黄土丘陵区退耕地草本植被群落叶片 C 含量上升, N 含量先上升后下降, P 含量下降, K 含量先下降后

回升,叶片 C/N 先下降后回升,C/P、C/K、N/P 不同程度上升;随着退耕时间的增加,根系 C 含量上升,N 含量先下降后回升,P 含量上升,K 含量先下降后上升,根系 C/N 先下降后回升,C/P 下降,根系 C/K 先上升后下降,N/P 先下降后回升;随着退耕时间的增加,土壤 C、N 含量上升(特别是 0~20cm 土层),P 含量在退耕 10 年内下降,在 10~25 年内回升,随后又开始下降,K 含量在退耕 1~20 年内不断上升,随后回落。

(2)C、N、P、K 在叶片、根系、土壤中的分配比例在退耕时间序列梯度上存在不同程度的变异性。对于植物器官而言,营养元素在叶片和根系间的分配比以下降趋势为主,存在向根系富集的趋势;对于植物器官和土壤而言,营养元素分配比下降趋势为主,是土壤养分状况不断改良的表现,而不同元素有所差异。

(3)不同恢复年限植物叶片、根系及土壤的化学计量特征变化规律并不同步,而是各自表现出其相对独立的规律。叶片、根系、土壤三者之间 C、N、P、K 及其特征比的相关性均未达到显著水平,说明三者之间并不是简单的线性关系,在环境因素的影响下可能存在更为复杂的非线性关系,需要进行更具针对性的实验研究。

参考文献:

- [1] 程滨,赵永军,张文广,等.生态化学计量学研究进展[J].生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [2] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, *et al.* Organism size, life history, and N:P stoichiometry[J]. *Bioscience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [3] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等.生态化学计量学特征及其应用研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5484-5492.
- [4] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等.北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J].环境科学,2010,31(8):1716-1725.
- [5] 刘超,王洋,王楠,等.陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J].植物生态学报,2012,36(11):1205-1216.
- [6] 张良侠,樊江文,张文彦,等.内蒙古草地植物叶片氮、磷元素化学计量学特征分析[J].中国草地学报,2014,36(2):43-48.
- [7] 宋彦涛,周道玮,李强,等.松嫩草地 80 种草本植物叶片氮磷化学计量特征[J].植物生态学报,2012,36(3):222-230.
- [8] 李婷,邓强,袁志友,等.黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].环境科学,2015,36(8):2988-2996.
- [9] Baldwin D S, Rees G N, Mitchell A M, *et al.* The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland[J]. *Wetlands*, 2006, 26(2): 455-464.
- [10] 安慧,杨新国,刘秉儒,等.荒漠草原区弃耕地植被演替过程中植物群落生物量及土壤养分变化[J].应用生态学报,2011,22(12):3145-3149.
- [11] 白文娟,焦菊英,马祥华,等.黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序[J].西北植物学报,2005,25(7):1317-1322.
- [12] 王世雄,王孝安,李国庆,等.陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释[J].生态学报,2010,30(6):1638-1647.
- [13] 李裕元,邵明安.子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J].生态学报,2004,24(2):252-260.
- [14] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6):540-550.
- [15] Jamison A. A tale of two brothers[J]. *Science*, 1993, 261(5120):497-498.
- [16] 刘兴诏,周国逸,张德强,等.亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J].植物生态学报,2010,34(1):64-71.
- [17] 银晓瑞,梁存柱,王立新,等.内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J].植物生态学报,2010,34(1):39-47.
- [18] 牛得草,董晓玉,傅华.长芒草不同季节碳氮磷生态化学计量特征[J].草业科学,2011,28(6):915-920.
- [19] 王振南,杨惠敏.植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J].草业科学,2013,30(6):927-934.
- [20] 任书杰,于贵瑞,陶波,等.中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J].环境科学,2007,28(12):2665-2673.
- [21] 焦峰,温仲明,李锐.黄土高原退耕还林(草)环境效应分析[J].水土保持研究,2005,12(1):26-29.
- [22] 谷长磊,刘琳,邱扬,等.黄土丘陵区生态退耕对草本层植物多样性的影响[J].水土保持研究,2013,20(5):99-103.
- [23] 苗光忠,陈谦.退耕还林还草是实现山川秀美的关键——以陕北退耕还林还草为例[J].水土保持学报,2000,14(2):1-5.
- [24] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2):151-163.
- [25] 郑淑霞,长官周平.黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J].自然科学进展,2006,16(8):965-973.
- [26] 张珂,何明珠,李新荣,等.阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J].生态学报,2014,34(22):6538-6547.
- [27] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812):578-580.
- [28] 王娟,陈云明,曹扬,等.子午岭辽东栎林不同组分碳含量与碳储量[J].生态学杂志,2012,31(12):3058-3063.
- [29] 施宇,温仲明,龚时慧.黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J].生态学报,2011,31(22):6805-6814.

- [30] 宋光, 温仲明, 郑颖, 等. 陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 125-130.
- [31] 戚德辉, 温仲明, 杨士梭, 等. 基于功能性状的铁杆蒿对环境变化的响应与适应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1921-1927.
- [32] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [33] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的 C: N: P 化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [34] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.

欢迎订阅 2016 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

《环境科学》2016 年为 16 开本,120 元/册,全年 12 期.

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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