

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究

李鑫¹, 曾全超^{2,3}, 安韶山^{1,2*}, 董扬红⁴, 李娅芸¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 以黄土高原纸坊沟流域 3 种不同植物类型(乔、灌、草)下优势物种的叶片及其枯落物为研究对象, 通过对其碳、氮、磷、钾含量及生态化学计量学特征的研究, 探讨退化生态系统植物内稳性、NP 限制率以及营养元素的回流关系, 以期对黄土高原植被恢复与重建以及不同物种的合理配置提供合理建议, 为完善生态化学计量学理论提供支撑。结果表明, 不同植物类型叶片碳氮磷含量变化较小, 钾含量变化较大, 表现为草本植物叶片钾含量显著高于乔木与灌木; 叶片在凋落前将大量的养分转移至其它器官, 防止养分的流失, 使得枯落物碳氮磷钾含量均小于叶片。碳、氮、磷、钾的回流率分别为 6.16% ~ 22.84%、24.38% ~ 65.18%、22.38% ~ 77.16%、60.99% ~ 89.35%, 其中碳、磷、钾的回流率以草本最大, 磷的回流率以灌木最大。乔木与灌木叶片与枯落物 N:P、N:K、C:N 比差异不显著, 草本植物差异显著。植物叶片 N:P 比变化范围为 12.14 ~ 19.17, 叶片枯落物 N:P 比变化范围为 12.84 ~ 30.67。通常将 N:P 比为 16 作为评价植物生长受氮或者磷限制的临界值, 不同植物类型叶片 N:P 比表现为灌木(19.17) > 乔木(15) > 草本(12.14), 说明该区灌木主要受磷含量的限制, 草本植物主要受氮含量限制, 乔木主要受氮磷含量共同限制。叶片钾含量与 N:P 呈极显著的负相关, 枯落物钾含量与 C:P 比呈极显著的负相关。综合研究表明, 该区 3 种植物类型碳氮磷含量无差异, 钾含量差异显著, 叶片碳氮磷钾回流率较大, 不同植物类型受氮与磷限制作用不一致植物在生长演替阶段对氮磷等元素的累积与回归表现出一定的特异性。

关键词: 纸坊沟流域; 植物类型; 叶片; 枯落物; 生态化学计量学

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1084-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.043

Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China

LI Xin¹, ZENG Quan-chao^{2,3}, AN Shao-shan^{1,2*}, DONG Yang-hong⁴, LI Ya-yun¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The purpose was to characterize the effects of vegetation types on plant leaf and litter carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and C:N:P:K ecological stoichiometric characteristics in seven dominant plant species, including *Robinia pseudoacacia*, *Syringa*, *Sophora viciifolia*, *Hippophae rhamnoides*, *Rosa xanthina*, *Artemisia sacrorum*, *Artemisia giraldii*, of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China. This paper indicated the differences between the contents of C, N, P and K and the characteristics of ecological stoichiometric in the different vegetation types, including forest type, shrub type and grass type. Concentrations of C, N, P and K were measured, and C:N:P:K was estimated for different vegetation types. There were no significant differences in leaf C, N and P concentrations among the three vegetation types. But significant differences in leaf K concentration existed, and the K concentration in leaf was the highest in grass type, and the lowest in shrub type. The contents of C, N, P and K in leaf were much higher than those in litter, especially in shrub and grass types. The resorption efficiencies of C, N, P and K were different, and their ranges varied 6.16% - 22.84%, 24.38% - 65.18%, 22.38% - 77.16% and 60.99% - 89.35%, respectively. Grass type had the highest C, P and K resorption efficiencies, and the lowest N resorption efficiency. Values of the N:P ratio in leaf varied in the range of 12.14-19.17, and varied in the range of 12.84-30.67 in litter. Values of the N:P ratio in leaf were the highest in shrub type (19.17), and the lowest in grass (12.14), indicating that the growth of shrub plants was limited by P, while the growth of grass plants was limited by N. The K concentration in leaf was significantly negatively correlated with values of the N:P ratio in leaf,

收稿日期: 2014-09-22; 修订日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171226); 国家自然科学基金重点项目(41030532); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0479); 西北农林科技大学“优秀人才科研专项”(QN2011049)

作者简介: 李鑫(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为植被恢复与土壤的相互作用机制, E-mail: zengchao256@126.com

* 通讯联系人, E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

and the K concentration in litter was significantly negatively correlated with values of the C:P ratio in leaf. Findings in this study highlighted the characteristics of accumulation and return of leaf and litters nutrients during the different vegetation succession on the Loess Plateau.

Key words: Zhifanggou watershed; vegetation types; leaf; litter; ecological stoichiometry

碳、氮、磷、钾作为植物生长的必需元素,对植物的生长发育及个体功能运行具有重要的作用^[1]. 生态化学计量学(ecological stoichiometry)结合了生态学和化学计量学的基本原理,是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是C、N、P)平衡的科学,它是分析多重化学元素的质量平衡对生态过程相互影响的一种理论,且逐渐成为研究退化生态系统植物内稳性和NP限制率的新的方法. 随着生态化学计量学理论的完善,研究领域逐渐从水生生态系统向陆地生态系统扩展. 陆地植物碳氮磷含量及其化学计量学特征,越来越成为研究者关注的热点^[2,3]. 植物N:P比营养限制理论已被广泛接受,并应用于不同生态系统的研究^[4-6]. 植物叶片是植物进行光合作用的主要器官,其N:P比的大小可用来表征陆地生态系统的生产力,同时也可表明该植物受到哪种元素的限制作用,但是这种限制关系会随着外界环境的改变而变化^[5,7-9]. N、P协同限制植物代谢,同时施加N、P造成的植物生长响应比单独施加时更明显^[10]. 通过对N:P比在植被恢复过程中养分限制的研究,为植被的合理配置提供科学依据.

黄土丘陵区纸坊沟流域作为一个完整的小流域,生态系统趋于稳定. 但是自1938年以来毁林开荒逐渐开展,到1958年为止果树及灌木面积减小到3.5 km²,生态环境急剧恶化,土壤侵蚀严重,生态系统逐渐退化^[11]. 近年来,大规模退耕还林(草)等生态工程的开展,植被得到了有效的恢复,土壤养分及结构等都得到了有效的改善,形成了乔木、灌木、草本相结合的多元生态系统. 但是对于该生态系统内植物叶片-枯落物的生态化学计量学特征还不了解,因此本研究选取该区域不同层次植物叶片与枯落物作为研究对象,运用生态化学计量学手段,分析不同植物类型的叶片与枯落物的生态化学计量学特征,探讨不同植物类型叶片与枯落物的养分变化以及相互关系,对于理解养分循环具有重要的现实意义,可为黄土高原植被恢复建设提供理论支撑,同时为完善陆地退化生态系统生态化学计量学提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原陕北安塞县纸坊沟流域

(36°51'30"N, 109°19'30"E),属暖温带半干旱气候,年均降水量549.1 mm,降水的年内分布不均,多暴雨,流域内梁峁起伏,地形破碎,是延河支流杏子河下游的一级支流,属典型黄土丘陵沟壑区,流域面积8.27 km²,沟壑密度达8.06 km·km⁻². 自国家“七五”计划开始,纸坊沟流域成为黄土高原综合治理试验示范区,经过20多年的综合治理,尤其是“退耕还林工程”的实施,该区域生态系统得以逐步恢复,并进入良性循环的轨道. 主要优势物种为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、丁香(*Syzygium aromaticum*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)等.

1.2 采样地设置与样品采集

植物叶片与叶片枯落物于2013年8月采集,此时植物生长处于生长旺盛期,叶片与枯落物并存. 在纸坊沟流域选取20 m×20 m的样方18个,在样方内根据生活型分成乔、灌、草这3个层次采集优势物种的叶片及相应的叶片枯落物. 选择长势均匀的优势物种,根据不同层次(高、中、低)、不同方位(东、西、南、北)采集单一物种叶片. 在样方内多点采集单一物种的枯落物,采集的样品质量大约为300 g左右,叶片于105℃下杀青15 min,然后65℃烘干至恒重.

1.3 样品测定

用粉碎机将植物叶片以及叶片枯落物磨成0.15 mm的粉末后测定其全碳、全氮、全磷、全钾含量. 植物叶片与枯落物的全碳用重铬酸钾外加热法测定;全氮、全磷、全钾采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,消煮液分别用凯氏法测定全氮,钒钼黄比色法测定全磷,火焰光度法测定全钾^[12]. 凋落物养分回收能力用养分回流率(*R*)表示,可以将其定义为:在秋季来临时,正常生长器官养分含量与凋落物中养分含量的差值,即凋落物在凋落前转移养分的量. 养分回流率可按下式计算:

$$R\% = \frac{T_{\text{叶}} - T_{\text{枯}}}{T_{\text{叶}}} \times 100$$

式中,*R*为养分回流率;*T*_叶为正常生长叶片中养分含量(g·kg⁻¹);*T*_枯为凋落物中养分含量(g·kg⁻¹).

表 1 所选植物物种名录
Table 1 List of selected plant species

植物类型	编号	物种	拉丁名	科
乔木	1	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	豆科 Leguminosae
	2	丁香	<i>Syzygium aromaticum</i>	木犀科 Oleaceae
灌木	1	沙棘	<i>Hippophae rhamnoides</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae
	2	狼牙刺	<i>Sophora viciifolia</i>	豆科 Leguminosae
	3	黄刺玫	<i>Rosa xanthina</i> Lindl	蔷薇科 Rosaceae
草本	1	铁杆蒿	<i>Artemisia sacrorum</i>	菊科 Asteraceae
	2	茼蒿	<i>Artemisia giraldii</i>	菊科 Asteraceae

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0 统计分析软件对养分与化学计量学比进行相关性分析,对不同植物类型间进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)以及多重比较,探讨不同植物类型间的养分及生态化学计量学特征差异. 运用 Excel 2013 和 Origin 8.0 进行数据处理和图形制作. C、N、P、K 采用质量分数,C:N、C:P、N:P、C:K、N:K、P:K 均采用质量比.

2 结果与分析

2.1 不同植物类型植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量变化

由图 1 可以看出,不同植物类型下植物叶片全碳含量的变化范围为 504.56 ~ 529.40 g·kg⁻¹,均值为 520.72 g·kg⁻¹,变异系数为 2.69%;全氮含量的变化范围为 27.18 ~ 33.40 g·kg⁻¹,均值为 30.00 g·kg⁻¹,变异系数为 10.50%;全磷含量的变化范围为 1.74 ~ 2.24 g·kg⁻¹,均值为 1.99 g·kg⁻¹,变异系数为 12.62%;全钾含量的变化范围为 10.66 ~ 21.67 g·kg⁻¹,均值为 15.66 g·kg⁻¹,变异系数为 35.62%. 不同植物类型下植物枯落物全碳含量的变化范围为 407.54 ~ 496.79 g·kg⁻¹,均值为 444.08 g·kg⁻¹,变异系数为 10.53%;全氮含量的变化范围为 11.63 ~ 22.25 g·kg⁻¹,均值为 16.59 g·kg⁻¹,变异系数为 32.20%;全磷含量的变化范围为 0.51 ~ 1.46 g·kg⁻¹,均值为 1.00 g·kg⁻¹,变异系数为 47.75%;全钾含量的变化范围为 2.31 ~ 5.71 g·kg⁻¹,均值为 3.85 g·kg⁻¹,变异系数为 44.72%.

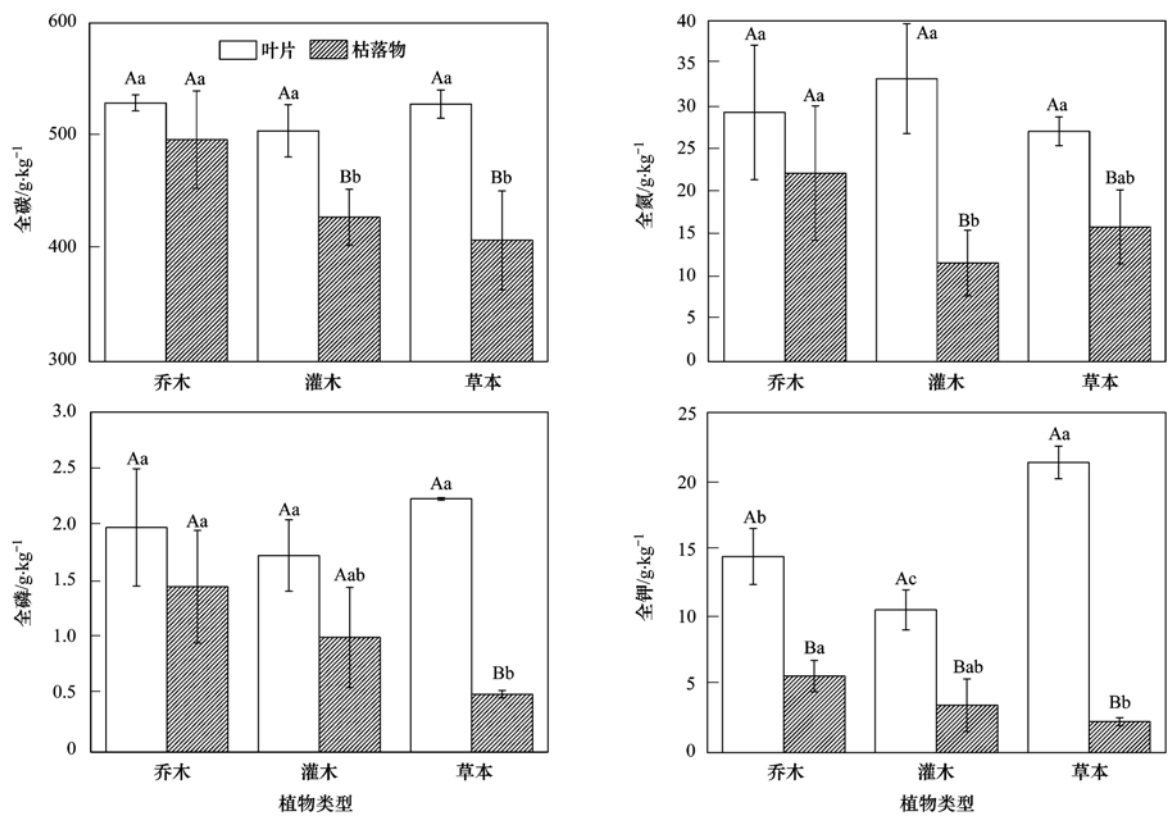
不同植物类型下植物叶片全碳含量具体表现为乔木 > 草本 > 灌木;全氮含量表现为灌木 > 乔木 > 草本;全磷、全钾含量均表现为草本 > 乔木 > 灌木. 不同植物类型下植物枯落物全碳、全磷、全钾含量均表现为乔木 > 灌木 > 草本;枯落物全氮含量表现为乔木最大,灌木最小. 不同植物类型下植物

叶片全碳氮磷钾含量均高于枯落物. 乔木叶片与枯落物的碳氮磷含量差异不显著,叶片钾含量显著高于枯落物($P < 0.05$);灌木和草本植物叶片碳氮磷钾含量显著高于枯落物($P < 0.05$). 植物叶片全碳、全氮、全磷含量在 3 种不同植物类型下差异不显著,钾含量差异显著($P < 0.05$);枯落物全碳、全氮、全磷、全钾含量随着植物类型的不同变异较大,其中乔木显著高于草本植物($P < 0.05$).

如图 2 所示,植物叶片凋落过程中 C、N、P、K 含量逐渐减低,碳的回流率为 6.16% ~ 22.84%,氮的回流率为 24.38% ~ 65.18%,磷的回流率为 22.38% ~ 77.16%,钾的回流率为 60.99% ~ 89.35%. 不同植物类型下,碳、磷、钾的回流率表现为乔木 < 灌木 < 草本,氮则表现为灌木 > 乔木 > 草本.

2.2 不同植物类型植物叶片和枯落物的生态化学计量学特征

由图 3 可以看出,不同植物类型叶片的生态化学计量学特征除 C:N 比值外均表现为灌木 > 乔木 > 草本,其中,N:P、P:K、N:K、C:P、C:K 比值的变化范围分别为 12.14 ~ 19.17、0.10 ~ 0.16、1.26 ~ 3.12、235.97 ~ 298.60、24.48 ~ 48.03,平均值分别为 15.37、0.14、2.17、273.25、36.5,变异系数分别为 23.11%、22.04%、42.84%、12.07%、32.27%;C:N 比值表现为草本 > 乔木 > 灌木,C:N 比值的变化范围为 15.61 ~ 19.48,平均值为 18.14,变异系数为 12.09%. 不同植物类型枯落物的生态化学计量学特征 N:P 比值表现为草本 > 乔木 > 灌木,N:P 比值变化范围为 12.84 ~ 30.67,平均值为 19.54,变异系数为 49.65%;P:K 比值表现为灌木 > 乔木 > 草本,P:K 比值的变化范围为 0.22 ~ 0.35,平均值为 0.27,变异系数为 24.78%;N:K 和 C:P 比值均表现为草本 > 灌木 > 乔木,N:K 和 C:P 比值的变化范围分别为 3.77 ~ 6.75、395.54 ~ 794.88,



图中不同大写字母表示同种植物类型叶片和枯落物含量差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同植物类型间叶片或枯落物含量差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同植物类型植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量

Fig. 1 Nutrient contents in leaf and litter of different vegetation types

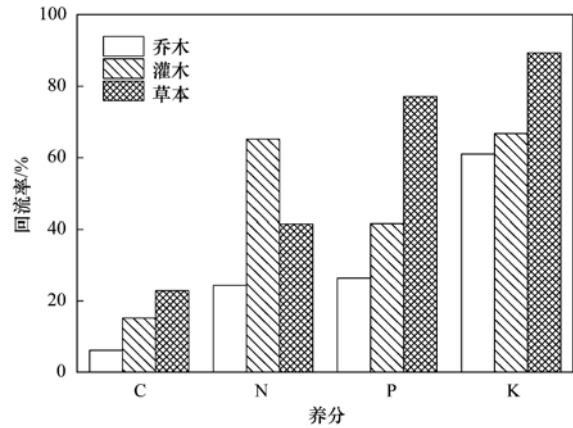


图 2 不同植物类型叶片变成枯落物碳氮磷钾回流率

Fig. 2 Nutrients resorption efficiencies in leaf and litter of different vegetation types

平均值分别为 5.11 ~ 592.59, 变异系数分别为 29.62%、33.70%; C: N 和 C: K 比值均表现为灌木 > 草本 > 乔木, C: N 和 C: K 比值的变化范围分别为 26.39 ~ 42.78、92.40 ~ 252.60, 平均值分别为 32.03、174.02, 变异系数分别为 29.08%、46.05%。

由图 3 可知, 乔木和灌木叶片与枯落物 N: P、N: K、C: P、C: K 差异不显著, 草本植物叶片与枯落物差异显著 ($P < 0.05$)。不同植物类型下, 枯落物 P: K、N: K、C: N、C: P、C: K 以及叶片 P: K、C: N、C: P 差异不显著; 灌木叶片 N: P 显著高于乔木与草本植物 ($P < 0.05$), 草本植物枯落物 N: P 显著高于乔木与灌木 ($P < 0.05$); 灌木叶片 N: K 显著高于乔木与草本植物, 乔木与草本植物差异显著 ($P < 0.05$); 灌木叶片 C: K 显著高于乔木与草本植物 ($P < 0.05$), 乔木与草本植物差异不显著。

2.3 不同植物类型植物叶片和枯落物生态化学计量学特征的关系

由表 2 可以看出, 不同植物类型植物叶片全碳只与 P: K 比值呈正相关, 与其他比值均呈负相关, 但相关性不显著; 植物叶片全氮与 C: N、C: P 比值呈负相关, 其中与 C: N 比的相关性显著 ($P < 0.05$), 与 N: P、P: K、N: K、C: K 比值均呈正相关, 其中与 N: K 比值的相关性显著 ($P < 0.05$); 植物叶片全磷与 P: K 呈正相关关系, 与 C: P 呈极显著的负相关 ($P < 0.01$), 与 N: P、N: K、C: K、C: N 均呈负

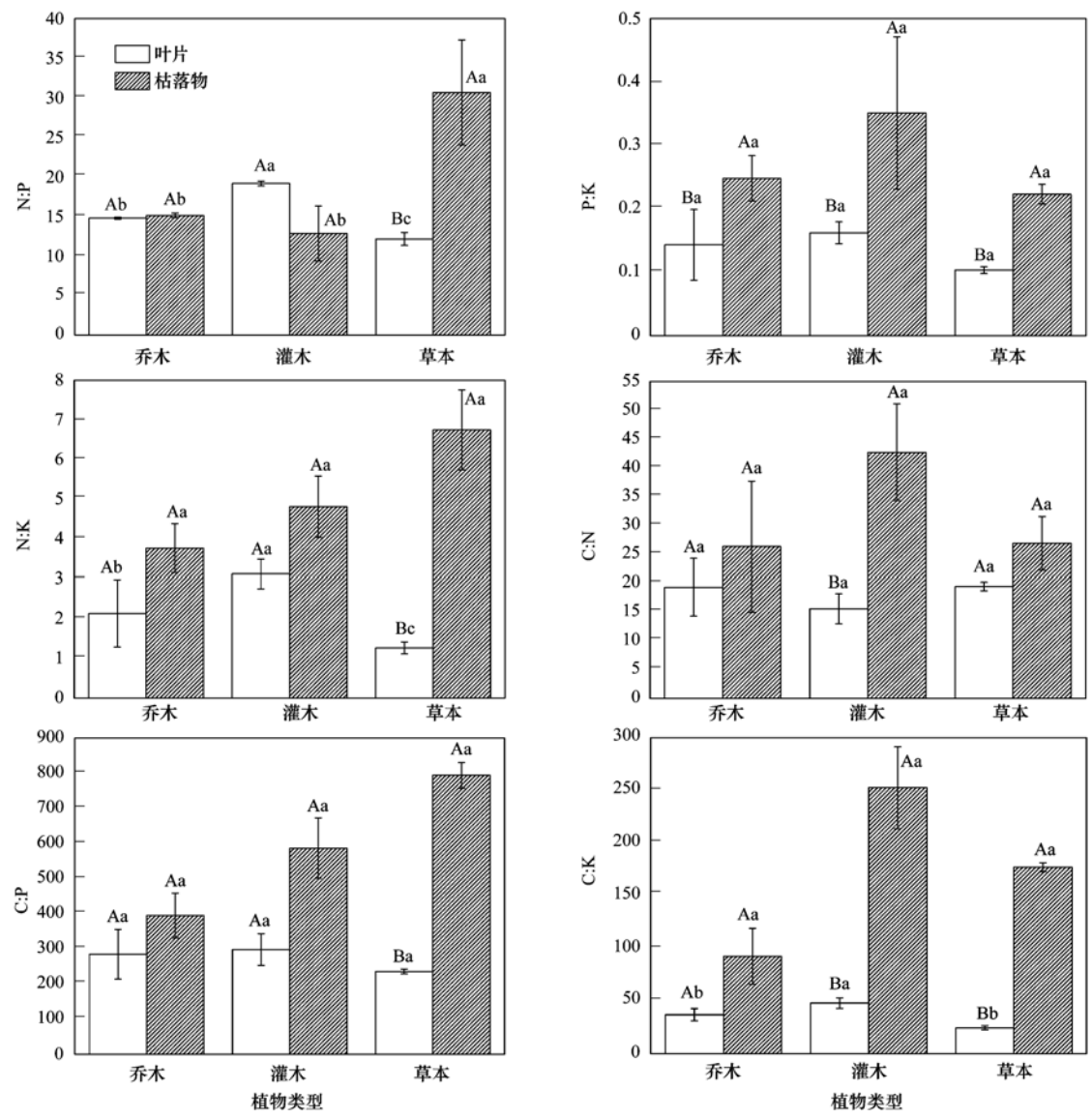


图3 植物叶片和枯落物生态化学计量学特征

Fig. 3 Characteristics of ecological stoichiometry in leaf and litter of different vegetation types

表 2 植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量与生态化学计量学特征相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlations between C,N,P,K nutrients and the characteristics of ecological stoichiometry in leaf and litter of different vegetation types

项目	元素	N: P	P: K	N: K	C: N	C: P	C: K
叶片	C	-0.431	0.068	-0.141	-0.196	-0.666	-0.448
	N	0.472	0.834 *	0.773 *	-0.966 **	-0.603	0.425
	P	-0.459	0.294	-0.004	-0.491	-0.986 **	-0.376
	K	-0.910 **	-0.742	-0.880 **	0.500	-0.390	-0.983 **
枯落物	C	-0.095	0.040	-0.051	0.211	0.069	0.092
	N	0.177	-0.445	-0.186	-0.819 *	-0.570	-0.593
	P	-0.570	-0.233	-0.700	-0.557	-0.909 **	-0.645
	K	-0.476	-0.463	-0.787 *	-0.680	-0.952 **	-0.797 *

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$,下同

相关,但相关性不显著;植物叶片全钾与 C: N 呈正相关,与其他比值均呈负相关,其中与 N: P、N: K、C: K呈极显著的负相关($P < 0.01$)。不同植物类型

植物枯落物全碳与 N: P、N: K 呈负相关,与其他比值均呈正相关;枯落物全氮与 N: P 呈正相关,与其他比值均呈负相关,其中与 C: N 呈显著的负相关(P

<0.05); 枯落物全磷与各比值之间均呈负相关,其中与 C:P 呈极显著的负相关($P<0.01$); 枯落物全钾与各比值之间均呈负相关,其中与 C:K、N:K 呈显著的负相关,和 C:P 呈极显著的负相关($P<0.01$).

表 3 叶片碳氮磷钾回流率与叶片及枯落物碳氮磷钾含量的相关性分析¹⁾

回流率	碳		氮		磷		钾	
	叶片	枯落物	叶片	枯落物	叶片	枯落物	叶片	枯落物
R_C	0.461	-0.900 **	0.446	0.157	0.730	0.096	0.483	0.146
R_N	-0.752	-0.409	-0.014	-0.854 *	-0.532	-0.377	-0.405	-0.505
R_P	-0.315	-0.311	-0.524	-0.397	-0.028	-0.910 **	0.586	-0.897 **
R_K	-0.449	-0.103	-0.746	-0.549	-0.311	-0.977 **	0.53	-0.939 **

1) * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$,下同

用主成分分析(PCA)法对不同植物类型下几种植物叶片和枯落物碳氮磷钾与生态化学计量学特征的关系进行分析. 如图 4 所示,不同植物类型下植物叶片全氮与 P:K、N:K、N:P、C:K 呈正相关性,与 C:P 和 C:N 呈负相关;全碳和全磷与 N:K、P:K 相关性较小;全钾与 C:N 呈正相关性,与其他比值均呈负相关性. 丁香叶片受 C:N 影响较大;黄刺玫叶片受 C:P 影响较大;沙棘叶片受 C:K、N:P、N:K、P:K 影响较大;狼牙刺和刺槐叶片受全氮和 P:

如表 3 所示,植物叶片 C 回流率与枯落物碳含量呈极显著的负相关,N 回流率与枯落物氮含量呈显著的负相关,P 回流率与枯落物 P、K 含量呈显著的负相关,K 回流率与与枯落物 P、K 含量呈显著的负相关.

K 影响较大;铁杆蒿和茭蒿叶片受全碳、全磷、全钾影响较大. 不同植物类型下植物枯落物全氮与 N:P 存在正相关性,与 N:K 相关性较小,与其他比值存在负相关性;枯落物全碳、全磷、全钾与各比值均存在负相关性. 刺槐群落受枯落物全氮影响较大;狼牙刺、丁香、沙棘群落受枯落物全碳、全磷、全钾影响较大;茭蒿和铁杆蒿群落受 N:P、N:K、C:P 影响较大;黄刺玫群落受 C:K、P:K、C:N 影响较大.

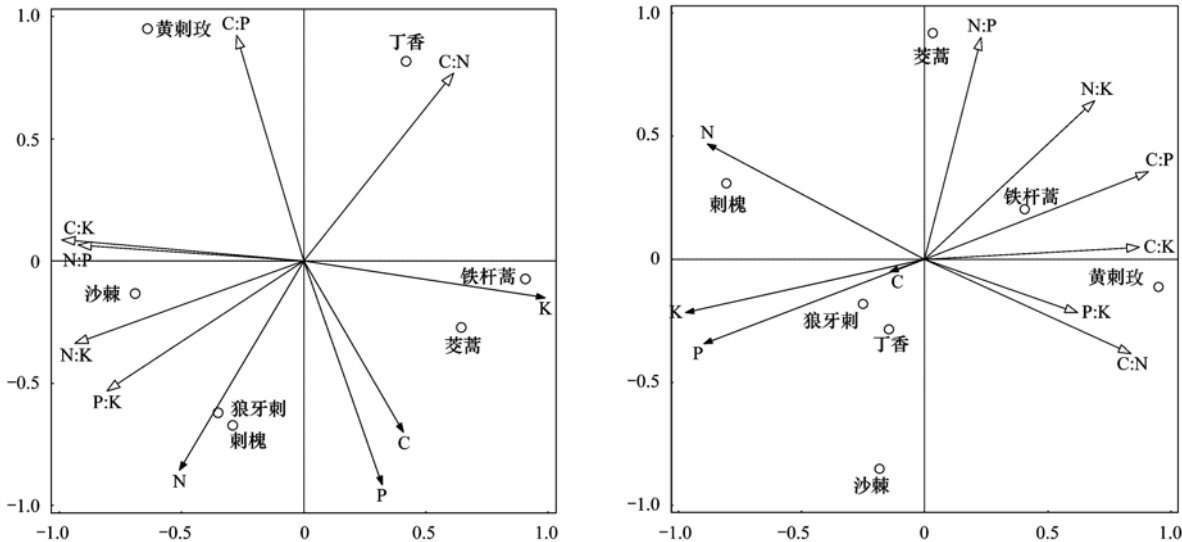


图 4 植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量与生态化学计量学特征关系

Fig. 4 Relationships between the contents of C,N,P,K nutrients and the resorption efficiencies in leaf and litter of different vegetation types

3 讨论

3.1 不同植物类型植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量变化

植物作为陆地生态系统的子系统,在调节整个系统的稳定性方面发挥着重要的作用. 碳、氮、磷、钾等元素是植物生长发育所必需的营养元素,直接

控制植物的生长及其行为过程^[13]. 植物叶片和枯落物作为生态系统中环境因子和生物因子的代表,对环境变化的反应比较敏感^[14]. 植物枯落物分解产生养分,土壤养分得到相应的补给,为植物自身养分的调节和需求提供了条件^[15]. 不同类型植物吸收养分的种类、数量以及对养分的利用效率均存在差异. 本研究表明,不同植物类型植物叶片全碳氮

磷钾含量均高于枯落物,其中植物叶片氮磷含量均略高于我国植物叶片氮($20.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[16]和磷($1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[17]的平均含量,这与郑淑霞等^[18]对黄土高原植物叶片的养分组成研究的结果相一致;植物叶片碳含量略高于全球植物叶片碳($464 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的平均含量,这与杨佳佳等^[19]对黄土高原刺槐林叶片碳含量的研究结果(低于全球植物叶片碳的平均含量)不一致,这可能是由于不同物种之间的差异和黄土高原多变的环境和气候条件引起。

植物枯落物的全碳氮磷钾含量与植物本身的再吸收能力有关。研究表明植物叶片掉落前会将养分转移到花、果实、枝、根中,从而防止养分随着叶片的凋落而流失^[20]。研究结果显示,乔木植物叶片全钾含量显著高于枯落物,灌木与草本植物叶片碳氮磷钾含量显著高于枯落物,这可能是由于凋落物在老化前会将部分养分转移到新鲜组织当中去,实现了养分的再吸收利用^[21]。养分再吸收不仅影响植物体内养分的有效性和养分循环过程,而且也是生物地球化学过程的一个关键步骤。本研究中,3种不同的植物类型下,植物叶片的碳氮磷钾明显高于枯落物,也证实了上述理论。其中,钾的转移能力最强,3种植物类型钾回流率均超过60%,草本植物钾回流率高达80%。钾在植物体内主要以离子态存在,不像碳、氮、磷主要以有机态形式储存在植物体内,流动性差^[12]。钾在植物水分竞争中起着非常重要的作用,植物对钾的吸收能力决定植物的耐旱性。本研究显示不同植物类型植物叶片钾的含量差异显著,这是因为研究区内随着生态系统的恢复,不同植物间对水分的竞争愈加激烈,植物通过吸收相对多的钾来提高自身的抗旱能力和水分吸收能力^[22]。草本植物叶片钾含量显著高于乔木和灌木,说明草本植物的耐旱性显著高于乔木和灌木。对不同植物类型植物枯落物进行分析发现,枯落物碳、氮、磷、钾随着植物类型的不同变异较大,乔木显著高于草本植物。乔木、灌木为深根系植物,在相同的环境中对土壤水分和养分具有较强的吸收能力,而草本植物为浅根系,较多的依靠自身养分的回流供给植物的生长。

3.2 不同植物类型植物叶片和枯落物的生态化学计量学特征变化

叶片的N、P含量和N:P比值反映了植物对当地土壤条件的适应^[9, 23],研究区域、生长阶段及植物种类的差异都会影响氮磷比临界值的变化^[9]。通常将N:P比为16作为评价植物生长受氮或者磷限

制的临界值,N:P比大于16受磷限制,小于14受氮限制,介于14~16则受氮和磷共同限制。本研究发现植物叶片N:P比表现为灌木最大(19.17),大于临界值16,主要受磷限制;乔木居中(14.78),介于14到16之间,受氮与磷的共同限制;草本植物N:P比最小(12.14),主要受氮限制。有研究表明,即使在同一气候区,不同的植物群落对养分的吸收也有差异^[18]。本研究区域草本植物主要生长在乔木或者灌木下,其覆盖度较大,草本植物作为浅根性植物对土壤表层养分含量吸收能力较强,特别是对磷的吸收。此外,草本植物叶片在凋落前磷的转移能力较强,显著高于乔木和灌木,能够有效地利用叶片中磷的含量,满足植物生长对磷的需求,因此纸坊沟流域草本植物受磷的限制较小,受氮等元素的限制较大。此外,草本植物叶片磷含量高于乔木和灌木,这也印证了草本植物的生长主要受氮的限制。研究表明,灌木受磷的限制较大,这与Han等^[24]对中国753种陆生植物的研究结果相似,我国陆地植被普遍受磷限制。Güsewell^[9]和贺金生等^[25]的研究发现叶片N:P比的变化主要取决于叶片磷含量的变化。本研究表明3种植物类型不同植物叶片磷含量差异不显著。叶片N:P比与叶片氮含量呈正相关,与磷含量呈负相关,但相关性不显著,但是与叶片钾含量呈显著的负相关,表明纸坊沟流域叶片N:P比可能与叶片钾含量有关。

草本植物枯落物N:P比(30.67)显著高于乔木和灌木,这是由于草本植物的枯落物磷含量较低,氮含量较高导致的。然而草本植物叶片磷含量较高,具有较高的N:P比,说明草本植物叶片在凋落前磷的再吸收能力较强。乔木与灌木叶片与枯落物的N:P比差异不显著,表明在由成熟叶片凋落的过程中叶片的N:P比变化较小。因此对于乔木与灌木,叶片和枯落物N、P的再吸收能力一致。

植物叶片的C:N和C:P比能够反映其同化碳的能力,在一定程度上反映植物营养的利用效率,具有重要的生态学意义^[26]。3种不同植物类型下叶片的C:N比低于全球水平(22.5),C:P比高于全球水平(232)。叶片C:P、C:K、C:N:P、K:N:K均小于枯落物,这与McGroddy等^[27]的研究结果一致,表明C、N的再吸收能力小于P、K。

4 结论

(1)植物叶片凋落之前C、N、P、K均发生了营养转移,不同元素养分回流率各不相同,其中以钾

的回流最为突出. 草本植物的养分回流率高于乔木与灌木. 较高的养分回流率表明纸坊沟流域植物具有较高的养分再吸收作用, 通过提高养分再吸收程度和养分再吸收效率来适应贫瘠的土壤, 对于该区植被恢复和生态系统的重建具有重要的现实意义.

(2) 植物叶片 N:P 比可以作为植物演替阶段的限制性营养元素指标. 不同种植物类型下植物叶片 N:P 比以灌木最高, 乔木居中, 草本最低, 这表明植物生长旺盛期(8 月)灌木和草本植物分别受磷、氮的限制, 这可为黄土高原植被恢复与重建提供理论指导.

参考文献:

- [1] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, **20**(1): 5-15.
- [2] Ågren G I. The C: N: P stoichiometry of autotrophs-theory and observations [J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(3): 185-191.
- [3] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, **30**: 1-67.
- [4] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1441-1450.
- [5] 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.
- [6] 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): 1726-1725.
- [7] Von Oheimb G, Power S A, Falk K, *et al.* N: P ratio and the nature of nutrient limitation in Calluna-dominated heathlands [J]. *Ecosystems*, 2010, **13**(2): 317-327.
- [8] 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.
- [9] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.
- [10] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, *et al.* Nutrient co-limitation of primary producer communities [J]. *Ecology Letters*, 2011, **14**(9): 852-862.
- [11] 卢宗凡, 梁一民, 刘国彬. 中国黄土高原生态农业 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 马永跃, 王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比 [J]. *亚热带农业研究*, 2011, **7**(3): 182-187.
- [14] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2411-2416.
- [15] Ågren G I, Bosatta E. *Theoretical ecosystem ecology: understanding element cycles* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [16] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [17] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学 [J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 58-63.
- [18] 郑淑霞, 上官周平. 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.
- [19] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究 [J]. *土壤学报*, 2014, **51**(1): 133-142.
- [20] 刘增文, 李雅素. 黄土残塬沟壑区刺槐人工林生态系统的养分循环通量与平衡分析 [J]. *生态学报*, 1999, **19**(5): 630-634.
- [21] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C: N: P 生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(2): 335-343.
- [22] Rivas-Ubach A, Sardans J, Perez-Trujillo M, *et al.* Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(11): 4181-4186.
- [23] Thompson K, Parkinson J A, Band S R, *et al.* A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora [J]. *New Phytologist*, 1997, **136**(4): 679-689.
- [24] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [25] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论 [J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 2-6.
- [26] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征 [J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2003, (1): 92-97.
- [27] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C: N: P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios [J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2390-2401.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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