

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

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 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用水安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

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

李婷¹, 邓强², 袁志友^{1,3}, 焦峰^{1,3*}

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

摘要: 选取陕西省延安市的富县、甘泉县、安塞县和榆林市的靖边县、横山县、榆阳区为研究区域, 测定和分析研究区植物叶片和不同土层土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量, 阐明植物叶片和土壤化学计量学特征随纬度梯度的变化模式, 为预测黄土高原植物营养元素的限制情况和生态系统的土壤养分状况提供依据. 结果表明: ①在 35.95° ~ 38.36°N 的纬度范围内, 植物叶片 C、N、P 含量的变化范围分别是 336.95 ~ 477.38、18.09 ~ 33.17 和 1.07 ~ 1.73 mg·g⁻¹, 平均值分别为 442.9、25.79 和 1.37 mg·g⁻¹, 变异系数分别为 11.9%、17.4% 和 13.3%; 植物叶片 C、N、P 含量与纬度之间存在显著的相关关系, 但植物叶片 C 含量与叶片 N、P 含量随纬度的变化存在差异: 随着纬度的升高, 植物叶片 C 含量随之降低; 而叶片 N、P 含量随之升高. 植物叶片 C:N、C:P 均随着纬度的升高, 呈现减小趋势; 而植物叶片 N:P 与纬度的相关关系并不显著. ②0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 这 3 个土层土壤 C 和 N 的空间分布具有一致性, 均随着纬度的升高呈指数减小的趋势, 且含量随着土层的加深逐级递减; 土壤 P 的空间分布与 C、N 不同, 随着纬度的升高呈现先增加后减少的趋势. 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层土壤 C:N 随纬度的升高变化不显著, 20 ~ 40 cm 土壤 C:N 随纬度的升高明显下降; 3 个土层的土壤 C:P、N:P 均随纬度的升高呈指数减少. ③植物 C、C:N 和 C:P 与不同土层的土壤 C、N、P 均呈现显著的相关关系, 植物 N、P 与土壤 C、N 呈现显著的相关关系, 而叶片 N:P 与不同土层土壤的 C、N、P 相关关系均不显著. 研究表明, 植物 C、N、P 含量与纬度之间存在一定的相关性, 而植物与土壤的 C、N、P 含量之间的相关性并不一致, 且与全球尺度相比, 黄土高原地区草本植物生长更易受磷限制.

关键词: 化学计量学特征; 碳氮磷; 养分; 纬度梯度; 黄土高原

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2988-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.035

Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau

LI Ting¹, DENG Qiang², YUAN Zhi-You^{1,3}, JIAO Feng^{1,3*}

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

Abstract: Field investigations and sampling were conducted in Loess Plateau, including Fu County, Ganquan County, Ansai County, Jingbian County and Hengshan County and Yuyang District. Our objective was to examine changes of leaf and soil stoichiometry characteristics along latitudinal gradient in Loess Plateau, and to provide references for the prediction of soil nutrient status of the ecosystem and constraints of plant nutrition elements in Loess Plateau. The results showed that ①Across the 35.95°-38.36°N latitude gradient, leaf C, N and P stoichiometry were ranging from 336.95 to 477.38 mg·g⁻¹ for C, from 18.09 to 33.173 mg·g⁻¹ for N and from 1.07 to 1.73 mg·g⁻¹ for P, the arithmetic means were 442.9 mg·g⁻¹, 25.79 mg·g⁻¹ and 1.37 mg·g⁻¹, separately, the variation coefficients were 11.9%, 17.4% and 13.3%. There were obvious correlation between leaf C, N, P and latitude, leaf C, C:N ratio and C:P ratio significantly decreased with the increasing latitude, while leaf N and P significantly increased with the increasing latitude. The relationship between N:P ratio and latitude was not significant. ②The content of soil organic C and soil total N decreased with increasing latitude and soil layer. In contrast, with the increase of latitude, soil P increased and then decreased. In the 0-10 cm, 10-20 cm soil layers, soil C:N ratio did not change significantly with latitude, while in the 20-40 cm layer, C:N ratio decreased obviously, but soil C:P and N:P ratios decreased with the increasing latitude in all soil layers. ③Leaf C, C:N and C:P ratios were correlated to soil organic C, soil total N and soil total P in all soil layers, leaf N and P were correlated to soil organic C and soil total N, while leaf N:P ratio was not correlated to soil organic C, soil total N and soil total P. There was a certain correlation between the leaf C, N, P and latitude, however, the correlations between leaf and soil C, N, P were inconsistent. These results demonstrate that

收稿日期: 2014-12-15; 修订日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271043, 31370455); 中国科学院知识创新工程“百人计划”项目; 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-406)

作者简介: 李婷(1988 ~)女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物生态学, E-mail: lovelyday0320@163.com

* 通讯联系人, E-mail: Jiaof@ms.iswc.ac.cn

the plants were under P limitation in Loess Plateau.

Key words: stoichiometry characteristics; CNP; nutrient; latitude gradient; Loess Plateau

生态化学计量学是探讨有机体碳(C)、氮(N)、磷(P)这3种主要组成元素的养分计量关系^[1,2]. C、N、P之间紧密的相互作用是影响生态系统生产力的主要因素^[3],而N、P作为组成有机体的两种基础元素,在生物体生命活动中起着重要作用^[4];与此同时,N、P作为限制植物生长的必需矿质元素^[5],其临界比值也是判断土壤对植物生长养分供应的指标^[6-8].就日前研究进展来看,研究植物和土壤的化学计量学特征有利于:揭示生物地球化学循环不同环节的养分迁移规律;阐明生态系统的稳定性和植物养分限制状况;以及提出植物对环境的适应策略.

利用化学计量学的方法探讨区域尺度上环境因子对植物的响应是当前的研究热点之一,不同尺度上植物叶片和土壤C、N、P化学计量学特征与温度、水分、光照等因子的关系及其变化规律已被广泛研究^[9-13],但其结果不尽相同.研究表明全球植物叶片C、N、P平均含量分别为464、20.6、2.0 mg·g⁻¹^[11];而郑淑霞等^[14]的研究中,黄土高原地区植物叶片有机C、N、P、C:N、C:P和N:P的平均值分别为438、24.1、1.6 mg·g⁻¹、21.2、312和15.4,氮含量远远高于全球平均水平,而磷含量相对较低;Reich等^[15]总结了全球452个样点1280种植物叶片的N、P分布格局,结果表明随着纬度的升高,叶片N、P含量升高,而N:P下降,且植物叶片N、P及其N:P与土壤养分有效性密切相关.Wright等^[16,17]分析了全球175个样点的2548种植物的养分组成后表示气候因子对植物养分空间分布的影响很弱.He等^[12]对中国草地213种植物化学计量学特征的研究结果与Wright等^[16,17]相一致.Han等^[18]首次在较大尺度上阐述了中国127个样点753种植物的N、P以及N:P与气候因子的相关关系,发现中国植物与全球尺度上植物的N、P分布存在差异,填补了国际相关研究中中国植物数据的空白.任书杰等^[19]也分析了中国东部南北样带654种植物叶片N、P化学计量学特征与气候因子的关系,研究表明,植物叶片N、P含量随纬度的升高显著升高,而N:P变化不明显.人们通常认为纬度梯度的差异是导致温度、湿度、光照等环境因子发生变化的主要因素,那么在黄土高原地区,纬度的变化究竟会如何影响植物叶片和土壤C、N、P化学计量学特

征,植物叶片和土壤化学计量学特征之间存在怎样的相关关系?本研究对黄土高原部分地区的15个样地进行采样调查,探讨黄土高原植物叶片和土壤C、N、P化学计量学特征沿纬度梯度的变化规律,以为预测黄土高原植物营养元素的限制情况和生态系统的土壤养分状况提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况和样地设置

研究区域由南向北分布在延安市的富县、甘泉县、安塞县以及榆林市的靖边县、横山县和榆阳区6个代表性较强的地区(图1).研究区位于中纬度温带,107.97°~109.87°E,35.95°~38.36°N,平均海拔为1371.6 m,年平均气温8.8℃,年平均降水量为505.3 mm,年日照时数为2395.6 h,日照百分率达54%,全年无霜期157 d.土壤类型以黄绵土为主,间有典型黑垆土、灰钙土和栗钙土,土地利用类型有林地、草地和耕地.研究区(表1)主要代表植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿(*Artemisia vestita*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、风毛菊(*Saussurea amurensis*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)等.

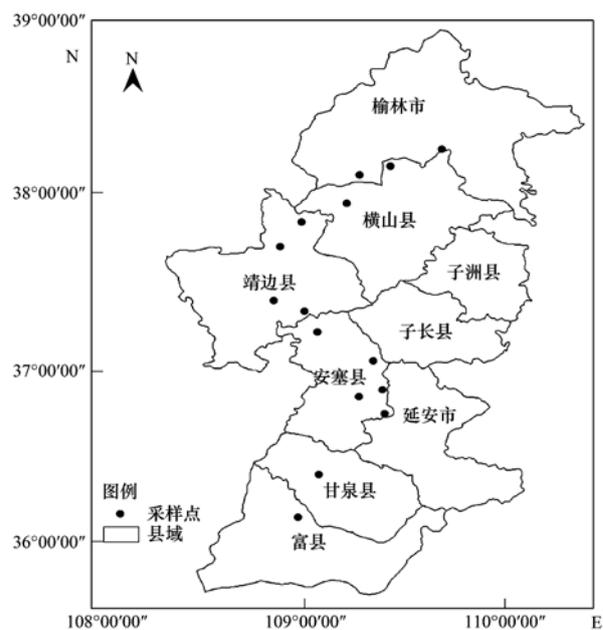


图1 研究区样点分布

Fig. 1 Sampling locations of studied region

表 1 采样点沿纬度梯度的分布情况

Table 1 Basic information of sample locations along the latitudinal gradient

样地	纬度/(°)	海拔/h	坡度/(°)	物种数	主要草本植物类型
A	35.95	1 100	28	13	长芒草、茜草、芦苇、蒲公英
B	36.22	1 105	17	11	长芒草、香青兰、败酱、芦苇
C	36.32	1 015	13	12	长芒草、达乌里胡枝子、蒲公英、角蒿
D	36.35	1 100	21	10	长芒草、达乌里胡枝子、蒲公英、芦苇
E	36.88	1 300	19	9	长芒草、黄花草木樨、铁杆蒿、达乌里胡枝子
F	36.89	1 330	11	7	长芒草、风毛菊、达乌里胡枝子、草木樨状黄芪
G	37.03	1 300	15	11	达乌里胡枝子、铁杆蒿、鬼针草
H	37.20	1 277	8	8	铁杆蒿、芦苇、长芒草、阿尔泰狗娃花
I	37.33	1 500	11	13	长芒草、茵陈蒿、香青兰、达乌里胡枝子
J	37.46	1 500	16	7	长芒草、达乌里胡枝子、沙蒿、拐轴鸦葱
K	37.67	1 600	12	7	远志、牻牛儿苗、香青兰、野豌豆
L	37.79	1 400	12	12	黑沙蒿、长芒草、狗尾草、猪毛蒿
M	37.95	1 100	23	6	沙蒿、阿尔泰狗娃花、猪毛蒿、达乌里胡枝子
N	38.13	1 148	27	6	沙蒿、猪毛蒿、沙打旺
O	38.36	1 205	29	6	沙蒿、猪毛蒿、达乌里胡枝子

1.2 研究方法

1.2.1 植物和土壤样品采集和处理

采样时间为 2012 年 8 月中旬植物生长旺盛期, 选取 15 个样地(每个样地所存在的生境和历史条件相差不大), 用全球定位系统(GPS)来确定采样点的经纬度. 在每个样地设置 6 个 1 m × 1 m 样方采集地带性植物, 在样方中采集植物植株顶部完整、健康的部分, 装入信封用于植物 C、N、P 含量的测定, 每一样方的样品由不同的植物个体混合而成. 同时每个样地按“蛇形”法选择 5 个样点进行土壤采样, 用土钻分别采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm 这 3 层土样, 分层将 5 个样点土样装袋.

1.2.2 植物 C、N、P 含量的测定

将每一个样地采集的混合植物样品经研磨后过 100 目筛, 经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 用全自动凯氏定氮仪(ATN-300)测定植物全 N; 用钼蓝比色法测定植物全 P; 植物有机碳采用外加热、K₂Cr₂O₇ 热容量法测定. 植物群落的叶片 C、N、P 含量以单位质量的养分含量表示.

1.2.3 土壤 C、N、P 含量的测定

土壤样品在室内自然风干后, 研磨过 0.15 mm 筛以备元素分析. 土壤 C 含量采用 K₂Cr₂O₇ 热容量法测定; 土壤 N 经 H₂SO₄-K₂SO₄:CuSO₄:Se 催化后用全自动凯氏定氮仪(ATN-300)测定; 土壤 P 用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮之后, 用钼蓝比色法测定. 植物和土壤元素的测定方法均参照文献[20]的方法.

1.2.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 对不同纬度梯度下的植物叶

片和土壤 C、N、P 含量做回归分析; 对植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量学之间做相关分析, 并对不同土层的土壤 C、N、P 含量做方差分析. 在进行数据分析之前, 对各类数据进行了正态分布的检验, 正态分布检验采用单个样本 K-S 检验. 分析得出, 黄土高原植物叶片和土壤元素含量均符合正态分布.

2 结果与分析

2.1 植物叶片 C、N、P 化学计量学特征沿纬度梯度变化

植物叶片 C、N、P 含量空间分布以及 C:N、C:P 存在很大的变异性, 叶片 N:P 的变异性较小; 叶片 C、N、P 含量的最大值分别是最小值的 1.54、1.83 和 1.62 倍; 变异系数分别为 11.9%、17.4% 和 13.3%; 三者的平均值分别为 442.9、25.79 和 1.37 mg·g⁻¹, 叶片养分含量的大小为: C > N > P, 相比而言, 叶片 C 含量变异性最小且分布较为集中, 超过 75% 植物的 C 含量在 400 mg·g⁻¹ 以上. 叶片 C:N、C:P 和 N:P 的分布区间分别是 10.16 ~ 26.39、194.77 ~ 446.15 和 15.42 ~ 21.62; 变异系数分别为 26.4%、23.2% 和 9.94%; 三者的平均值分别为 17.9、332.1 和 18.7. 与此同时, 黄土高原地区植物叶片 C、N、P 含量之间也存在显著的相关关系; 叶片 C 含量与 N、P 含量之间存在极显著的负相关性 ($R^2 = -0.629$, $P < 0.01$; $R^2 = -0.749$, $P < 0.001$), 且叶片 C 与 P 含量的相关性更强一些, 而叶片 N、P 含量之间则存在极显著的正相关性

($R^2 = 0.828, P < 0.001$).

如图 2 所示: 植物叶片 C、N、P 含量与纬度之间存在显著的相关关系, 但叶片 C 与叶片 N、P 含量随纬度的变化存在明显的差异. 随着纬度的升高, 叶片 C 含量随之降低 ($R^2 = 0.794, P < 0.001$);

而叶片 N、P 含量随之升高 ($R^2 = 0.850, P < 0.001$; $R^2 = 0.845, P < 0.001$). 叶片 C:N、C:P 均随着纬度的升高, 呈现减小趋势 ($R^2 = 0.858, P < 0.001$; $R^2 = 0.784, P < 0.001$); 而叶片 N:P 与纬度的关系并不显著 ($R^2 = 0.085, P = 0.723$).

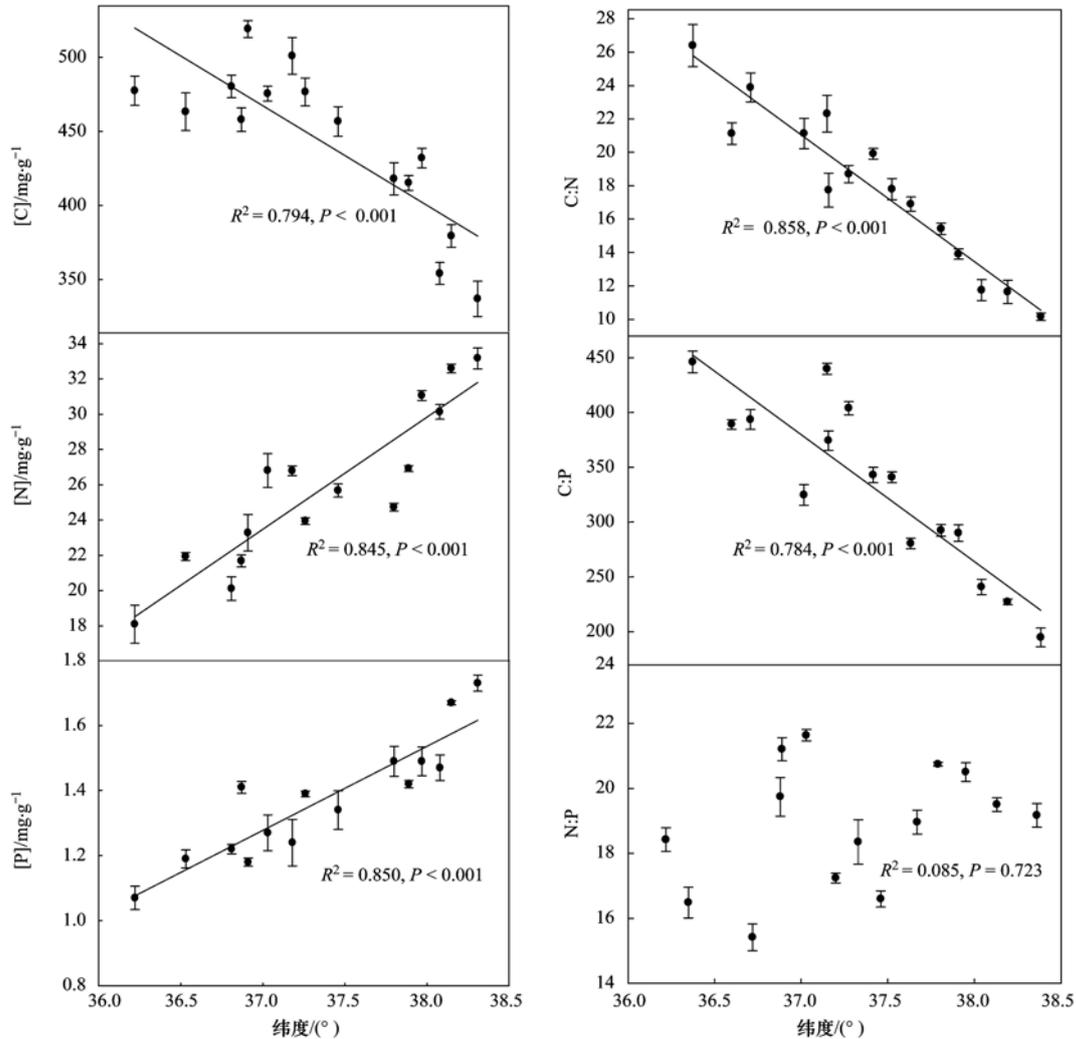


图 2 植物叶片化学计量学特征随纬度的变化规律

Fig. 2 Variation of leaf stoichiometry characteristics along the latitudinal gradient

2.2 土壤 C、N、P 含量沿纬度梯度变化

如图 3 所示, 0 ~ 10 cm 土层土壤 C ($1.09 \sim 17.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、N ($0.12 \sim 1.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、P ($0.48 \sim 1.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 平均数分别为 6.09、0.70 和 0.79 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 变异系数分别为 87.8%、81.7% 和 29.2%; 10 ~ 20 cm 土层土壤 C ($0.99 \sim 8.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、N ($0.11 \sim 1.11 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、P ($0.49 \sim 1.11 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 平均数分别为: 3.62、0.45 和 0.76 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 变异系数分别为: 59.6%、58.3% 和 24.5%; 20 ~ 40 cm 土层土壤 C ($0.91 \sim 4.69 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、N ($0.19 \sim 0.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、P ($0.48 \sim 1.05$

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 平均数分别为: 2.45、0.32 和 0.74 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 变异系数分别为: 54.2%、33.4% 和 23.1%. 土壤 C 的空间变异性最大, P 的变异性最小. 与此同时, 根据方差分析的结果显示, 不同土层土壤 C、N、P 含量的差异也不同: 0 ~ 10 cm 与 10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土层相比, 土壤 C、N 含量差异较为显著, 而 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层的土壤 C、N 含量差异不显著. 与不同土层土壤 C、N 含量变异性不同, 土壤 P 含量在 3 个土层的变化均不显著.

从图 3 可知, 土壤 C 和 N 含量的变化曲线大致相同, 3 个土层的土壤 C、N 含量均随着纬度的升高

呈现指数减小,且回归方程均达到显著水平($P < 0.01$);与土壤 C、N 变化趋势不同,P 的变化趋势以二项式曲线方程的拟合最优,随纬度的升高先增加后减少,3 个土层 P 含量均从 35.95°N 开始增加,几乎均在 36.7°N 左右达到最大值,随之逐渐减少,回归方程也较为显著($P < 0.01$).

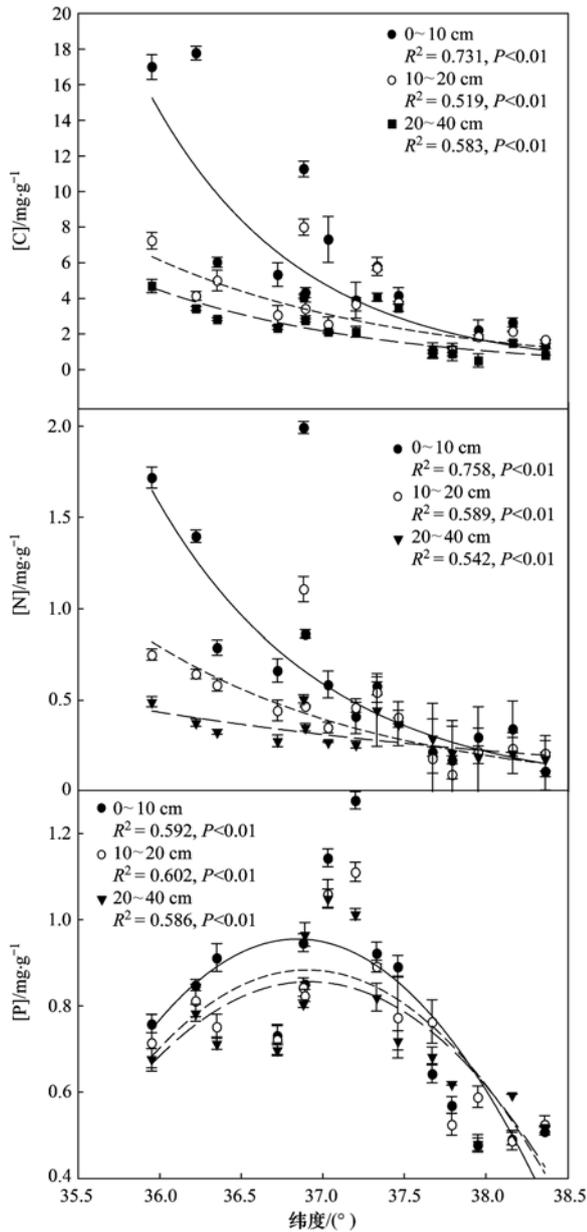


图3 不同土层土壤 C、N、P 含量随纬度的变化规律

Fig. 3 Variation of soil C, N and P content in the different layers along the latitudinal gradient

2.3 土壤 C、N、P 化学计量学特征沿纬度梯度变化

如图 4 所示,0~10 cm 土层土壤 C:N(4.99~12.45)、C:P(1.70~22.38)、N:P(0.20~2.26),平均数分别为:8.68、7.39 和 0.86,变异系数分别为:29.1%、86.5% 和 75.3%;10~20 cm 土层土壤

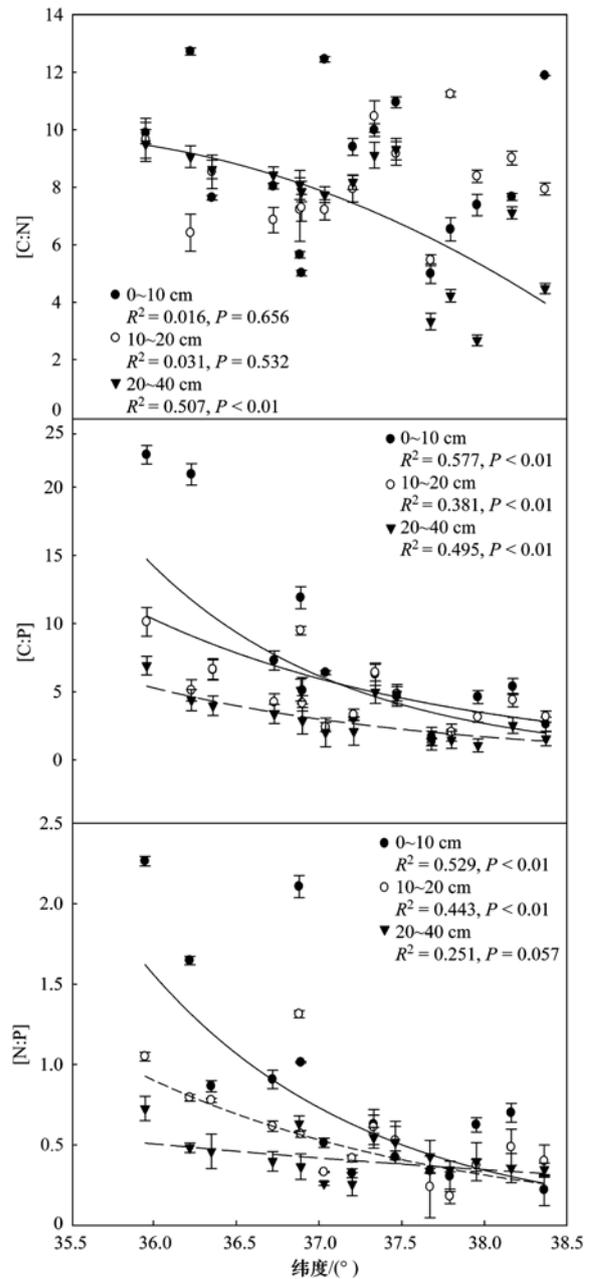


图4 土壤 C:N、C:P、N:P 含量随纬度的变化规律

Fig. 4 Variation of soil C:N, C:P and N:P along the latitudinal gradient

C:N(5.46~11.24)、C:P(1.31~10.12)、N:P(0.18~1.31),平均数分别为:8.19、4.71 和 0.43,变异系数分别为:19.6%、54.6% 和 53.2%;20~40 cm 土层土壤 C:N(2.27~9.51)、C:P(1.06~6.91)、N:P(0.26~0.73),平均数分别为:7.18、3.24 和 0.43,变异系数分别为:32.7%、53.2% 和 30.4%。土壤 C:P 的空间变异性最大,其次是土壤 N:P、土壤 C:N 的变异性最小。与此同时,0~10 cm 与 10~20 cm 的土壤 C:N 随纬度的变化不显著($P > 0.05$),而 20~40 cm 的土壤 C:N 随纬度的升高,逐渐

减少,差异显著($P < 0.01$); 土壤 C:P 和 N:P 均为随着纬度的升高呈现指数下降趋势,回归方程拟合较为显著($P < 0.01$). 方差分析结果显示:0~10 cm 与 10~20 cm 土层土壤 C:N 差异不显著,而 20~40 cm 土层的土壤与 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤 C:N 差异显著; 不同土层土壤 C:P 和 N:P 差异均较为显著.

2.4 植物与土壤 C、N、P 化学计量学特征的关系

通过分析植物叶片化学计量学特征与土壤因子的关系,发现不同土层的土壤 C、N、P 含量与植物叶片 C、N、P 含量及 C:N、C:P 和 N:P 的相关关系不同(表 2). 总体来说,除植物叶片 N:P 以外,叶片 C、N、P 含量及 C:N、C:P 与不同土层的土壤 C、N 含量均存在一定的相关关系; 相比叶片 C 及 C:N、C:P 与土壤 P 含量之间显著的相关性而言,植物 N、P 和 N:P 与土壤 P 含量的相关性并不显著. 其中叶

片 C 含量与 10~20 cm 的土壤 N 含量、各个土层的土壤 P 含量均存在极显著的相关关系($P < 0.01$), 叶片 C 含量与其他土层的土壤 C、N、P 均存在显著的负相关关系($P < 0.05$); 叶片 N 含量与 20~40 cm 的土壤 C 含量存在极显著的负相关关系($P < 0.01$), 与其他土层的土壤 C、N 存在显著的负相关关系($P < 0.05$), 叶片 P 含量与 0~10 cm、20~40 cm 的土壤 C 含量以及 10~20 cm、20~40 cm 土壤 N 含量之间存在极显著的负相关关系($P < 0.01$). 叶片 C:N 和 C:P 与不同土层的土壤 C、N 含量呈现极显著的相关关系($P < 0.01$), 而与不同土层的土壤 P 含量呈现显著的相关关系($P < 0.05$), 而叶片 N:P 与不同土层土壤的 C、N、P 关系均不显著, 相对而言土壤 C 含量对植物 N:P 影响比土壤 N、P 稍明显些,但均未达到显著水平($P > 0.05$).

表 2 植物叶片化学计量学特征与不同土层土壤 C、N、P 的相关关系¹⁾

Table 2 Correlations between leaf stoichiometry characteristics and soil C, N and P in the different layers

项目	不同土层/cm	C	N	P	C:N	C:P	N:P
SOC	0~10	0.567*	-0.668*	-0.736**	0.749**	0.756**	-0.127
	10~20	0.653*	-0.691*	-0.684*	0.777**	0.755**	-0.267
	20~40	0.685*	-0.757**	-0.712**	0.791**	0.758**	-0.338
STN	0~10	0.671*	-0.648*	-0.637*	0.771**	0.823**	-0.078
	10~20	0.710**	-0.696*	-0.714**	0.784**	0.794**	-0.194
	20~40	0.675*	-0.630*	-0.772**	0.746**	0.771**	-0.209
STP	0~10	0.782**	-0.511	-0.458	0.609*	0.659*	0.053
	10~20	0.723**	-0.480	-0.514	0.532*	0.619*	-0.007
	20~40	0.775**	-0.360	-0.456	0.468	0.629*	0.223

1) SOC: 土壤有机碳; STN: 土壤全氮; STP: 土壤全磷; * 表示 0.05 水平上的显著性; ** 表示 0.01 水平上的显著性

3 讨论

3.1 纬度梯度上植物叶片化学计量学特征的变化规律

纬度梯度上环境因子的变化一方面会影响植物体内某些组织的特性,例如可能通过影响酶类活性、反应介质和膜系统渗透性来增加或削弱植物细胞功能的发挥,从而影响植物体的代谢活动; 另一方面,也会通过影响土壤有机质的分解和矿化作用,增加或减少土壤中的有效 N、P 含量制约植物体的生长发育,这两方面的影响最终都会体现在植物叶片 C、N、P 化学计量学特征的变化上.

本文中植物叶片 C 含量随着纬度的降低而升高与 Bussotti 等^[21]的研究结果一致,主要是因为,随着纬度的降低,温度会不断升高,温度的升高在一定程度上会导致干旱情况的加剧,植物为了适应干旱的环境,提高了自身体内富 C 的组织比例(如木质

素),以保护植物体不受损伤. Kerkhoff 等^[22]研究认为全球尺度上 1 054 种植物的叶片 N、P 含量与纬度之间没有明显的相关性,而 N:P 随着纬度升高而显著下降; McGroddy 等^[23]也认为森林生态系统中 55 种植物的叶片 N:P 随纬度的升高而明显降低. Reich 等^[15]发现:从热带雨林到寒冷干旱的中纬度地区,植物叶片 N、P 的含量均呈现上升趋势. 本文中黄土高原植物叶片 N、P 含量的变化与 Reich 等^[15]的研究结果一致. 根据 Reich 等^[15]的温度-植物生理假说(Temperature-Plant Physiological Hypothesis)可知:植物的 N、P 调节机制是温度敏感型,随着纬度的不断升高,温度逐渐降低,影响植物体内富 N 的酶和富 P 的 RNA 的活性,导致植物生化反应速率下降,植物需要维持较高的 N、P 含量来抵消低温对代谢反应的抑制作用,从而提高自身组织对温度的适应和营养成分的利用率. 由于植物叶片 C 含量随着纬度的升高而降低,而 N、P 含量随

之升高,因此,植物的 C:N、C:P 也会随之降低,但 N:P 与纬度的相关性并不显著,与文献[15,22,23]的研究结果并不一致. 主要原因之一是本研究区域纬度变化范围小(35.95°~38.36°N),而 Reich 等^[15]的研究在全球的纬度范围是 43°S~70°N; 其次是植物 N、P 含量同时随着温度的升高而升高的变化趋势减缓了 N:P 的变化. 相比本研究的纬度范围来说虽然 Han 等^[18]在中国尺度选取的纬度范围也较大(18°~49°N),而两者研究结果相似的原因主要是 Han 等^[18]在对中国尺度的研究中涵盖了高海拔地区(青藏高原),该地区可能通过对环境温度的影响改变植物 N:P 对纬度变化的响应.

3.2 纬度梯度上土壤 C、N、P 含量的变化规律

相关研究已证实:土壤 P 主要来自岩石风化,土壤 C 主要取决于土壤有机质含量和凋落物的分解,土壤 N 主要来源于凋落物合成的有机质以及大气氮沉降^[24]. 因此,从一定程度上来说,土壤 N 和 C 主要与生物因素有关,且两者间存在良好的耦合关系,对环境因子的响应一般总是同步的,两者的空间分布具有一致性^[25]. 实际上,土壤 C、N、P 含量的变化与地上植物种类、丰度、植被生物量以及地形等其他因素均有一定的关系.

土壤 C、N 的空间分布受气候条件和成土作用机制的控制,由于水热、植物、地貌、母质、土壤微生物等的影响^[26],土壤 C、N 空间分布的变化较大. 一般而言,高温湿润的环境有利于土壤有机质的积累^[27],而随着纬度的升高,水热条件的缺失,植物地上生物量逐渐减少,随之形成的凋落物也不断减少,致使输送到土壤中凋落物分解合成的有机质含量降低^[28],形成黄土高原从南到北,土壤 C、N 含量不断下降的变化趋势.

不同土层土壤 C、N 含量差异性也不同^[29],不少研究证实,植物和气候条件是影响土壤 C、N 含量垂直分布的主要因素^[30]. 凋落物分解合成的有机质作为土壤 C、N 主要来源之一^[31,32],首先在表层土壤密集,之后随水分或其他介质向土壤下层迁移扩散,形成土壤 C、N 含量从表层向下层逐渐降低的分布格局^[8],因此,表层土壤的 C、N 含量较高,10~20 cm 和 20~40 cm 土层的 C、N 含量降低且差异不显著. 随着纬度的不断升高,被土壤吸收利用的凋落物逐渐减少^[33],导致土壤 C、N 含量和不同土层差异性的减小.

与土壤 C、N 空间变异性不同,土壤 P 的空间变异性最小,这主要是因为,P 是一种沉积性元素,

主要来源于岩石风化,由于岩石风化是一个漫长的过程^[8],且风化程度在 0~60 cm 的土层差异不大,因此不同土层的土壤 P 含量空间分布均比较稳定. 影响土壤 P 含量的因素主要包括:成土母质、气候、土壤的生物地球化学循环过程等. 其中,气候变化是影响土壤 P 空间分布的最主要因素^[33]. 本研究结果中,随着纬度的升高,土壤 P 含量先呈现缓慢的增加,而后持续降低. 主要是因为黄土高原南部相比北部而言高温多雨的气候条件有利于岩石风化,增加了土壤 P 含量,但同时黄土高原的水土流失也会造成土壤 P 的部分淋溶,两者相互作用使得土壤 P 含量呈缓慢增加的趋势. 随着纬度升高,温度和降水量不断降低,黄土高原的土壤类型由黄土和黏黄土转变为砂黄土^[28],砂黄土的保肥保水性较差,不利于有机质的吸收,导致土壤 P 含量的持续下降.

3.3 纬度梯度上土壤 C、N、P 化学计量学特征的变化规律

本研究结果显示:0~10 cm 与 10~20 cm 的土壤 C:N 的空间变异性相对较低,平均变异系数为 25.5%,20~40 cm 土壤 C:N 空间变异性较大,变异系数为 56.3%. 0~10 cm 与 10~20 cm 的土壤 C:N 之所以随纬度的升高没有明显的变化,主要是因为土壤 C 和 N 的空间分布具有一致性. 20~40 cm 土壤 C:N 持续下降与文献[34,35]的研究结果一致,随着土层深度的不断增加,土壤有机质趋于稳定,而大气氮沉降和有机质矿化作用使土壤 N 含量在一定范围内增加,从而导致两者比值发生较大变化.

不同于土壤 C:N,土壤 C:P、N:P 的空间变异性较大,且随着纬度的升高呈指数减少,主要是因为土壤 P 相对而言变化幅度小且较稳定,而土壤 C、N 的变化受气候影响显著^[34],随着纬度的不断升高,水热条件的缺失,导致土壤 C、N 含量明显降低,这一方面引起土壤 C:P、N:P 随纬度升高逐渐下降的变化;另一方面也使得土壤 C:P、N:P 在不同土层差异较为显著.

3.4 植物叶片化学计量学特征与土壤 C、N、P 含量的相关关系

植物与土壤作为生物地球化学循环的不同环节,两者之间存在必然的联系. 植物通过根系从土壤吸收养分,同时以凋落物的形式将 C、N、P 等养分归还土壤^[36],形成生态系统养分转化的有效循环过程,植物地上部分元素特征通常与土壤养分含量

具有一定的相关性^[7]。黄土高原植物叶片 C、N、P 含量之所以与土壤 C、N 呈现较为显著的相关关系,是因为植物根系对土壤养分的吸收利用是土壤速效养分输出的主要途径,土壤作为植物生长的主要基质,其中的有机质、硝态氮和铵态氮经过分解源源不断地为植物正常生理活动提供必要的养分,使得土壤与植物在养分供应与需求间通过动态交换达到并维持一个平衡的元素比^[37];叶片 N、P 含量与土壤 P 的相关性不显著,与顾大彤等^[38]和丁小慧等^[39]的研究结果一致,主要是由于土壤 P 元素在土壤中的迁移性较差,植物吸收利用的土壤 P 含量相对 C、N 而言相对较少。植物对土壤中营养元素的吸收和利用是一个极其复杂的过程,不仅受养分含量的影响,还会受到土壤 pH、微生物活性以及种内和种间竞争等多种因子的控制^[40, 41]。

于此同时,植物叶片 N:P 临界值通常被作为描述土壤养分限制性的指标^[9, 42],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^[43]。与全球尺度的研究结果相比,黄土高原以及中国区域相对较高的 N:P 和较低的叶片 P 含量都进一步说明了中国区域的植物生长受 P 的限制较大。

4 结论

(1) 在 35.95° ~ 38.36°N 的范围内,植物叶片 C、N、P 含量与纬度之间存在显著的相关关系,但是植物叶片 C 含量与叶片 N、P 含量随纬度的变化存在明显的差异。随着纬度的升高,植物叶片 C 含量随之降低;而叶片 N、P 含量随之升高。植物叶片 C:N、C:P 均随着纬度的升高,呈现减小趋势;而植物叶片 N:P 与纬度的关系并不显著。

(2) 黄土高原土壤 C、N 含量随着纬度的升高呈指数减少趋势,说明土壤 C、N 含量在空间分布上具有一致性;土壤 P 含量随着纬度的升高先增加后减小,且土壤 P 的空间变异性最低;土壤 C、N、P 化学计量学特征变化也不同,0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 的土壤 C:N 随纬度的变化较为稳定,20 ~ 40 cm 的土壤 C:N 则随纬度的升高显著降低;而 C:P、N:P 均呈现随纬度的升高指数下降的趋势,且不同土层 C:P、N:P 差异显著。

(3) 植物 C 与不同土层的土壤 C、N、P 均呈现显著的相关关系,植物 N、P 与土壤 C、N 呈现显著

的相关关系,而与 P 的相关性均不显著。叶片 C:N 和 C:P 与不同土层的土壤 C、N、P 含量均呈现显著的相关关系,而叶片 N:P 与不同土层土壤的 C、N、P 关系均不显著。出现上述结果,均是黄土高原植物为了提高自身对营养成分的吸收利用率和对环境适应性的表现。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索 [J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(6): 1007-1019.
- [3] Chapin F S III, Matson P A, Mooney H A. *Principles of terrestrial ecosystem ecology* [M]. New York: Springer, 2002.
- [4] 刘雯霞, 朱柯嘉. 青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量学特征研究 [J]. *中国草地学报*, 2013, **35**(2): 52-58.
- [5] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, **164** (2): 243-266.
- [6] Wassen M J, Olde V, Harry G M, *et al.* Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1995, **6**(1): 5-16.
- [7] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, **30**: 1-67.
- [8] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量学特征 [J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 64-71.
- [9] 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.
- [10] Reich P B, Ellsworth D S, Walters M B, *et al.* Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes [J]. *Ecology*, 1999, **80**(6): 1955-1969.
- [11] 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.
- [12] He J S, Fang J Y, Wang Z H, *et al.* Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. *Oecologia*, 2006, **149**(1): 115-122.
- [13] Braakhekke W G, Hooftman D A P. The resource balance hypothesis of plant species diversity in grassland [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, **10**(2): 187-200.
- [14] 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.
- [15] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, **101**(30): 11001-11006.
- [16] 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.
- [17] Wright I J, Reich P B, Westoby M, *et al.* The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, **428** (6985): 821-827.
- [18] Han W X, Fang J Y, Guo D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [19] 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.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Bussotti F, Borghini F, Celesti C, *et al.* Leaf morphology and macronutrients in broadleaved trees in central Italy. *Tress: Structure and Function*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **14** (7): 361-368.
- [22] Kerkhoff A J, Enquist B J, Elser J J, *et al.* Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, **14** (6): 585-598.
- [23] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C: N: P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial red field-type ratios[J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2390-2401.
- [24] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [25] 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.
- [26] 胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. *草业学报*, 2004, **13**(6): 14-20.
- [27] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 等. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(9): 1494-1498.
- [28] 涂夏明, 曹军骥, 韩永明, 等. 黄土高原表土有机碳和无机碳的空间分布及碳储量[J]. *干旱区资源与环境*. 2012, **26** (2): 114-118.
- [29] 王维奇, 仝川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(3): 238-242.
- [30] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, *et al.* Storage, Patterns and environmental controls of soil organic carbon in China[J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(2): 131-141.
- [31] 李金芬, 程积民, 刘伟, 等. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征[J]. *草地学报*, 2010, **18**(5): 661-668.
- [32] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. *浙江林学院学报*, 2004, **21**(4): 418-423.
- [33] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. *土壤学报*, 2013, **50** (4): 818-825.
- [34] 刘万德, 苏建荣, 李帅峰, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、P、N 化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2010, **30** (23): 6581-6590.
- [35] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 10-21.
- [36] Agren G I, Bosatta E. *Theoretical ecosystem ecology: understanding element cycles* [M]. England: Cambridge University Press, 1998.
- [37] 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.
- [38] 顾大彤, 陈双林, 黄玉清. 土壤氮磷对四季竹叶片氮磷化学计量特征和叶绿素含量的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, **35**(12): 1219-1225.
- [39] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. *生态学报*, 2012, **32**(11): 3467-3476.
- [40] Shaver G R, Chapin III F S. Long-term responses to factorial, NPK fertilizer treatment by Alaskan wet and moist tundra sedge species[J]. *Ecography*, 1995, **18**(3): 259-275.
- [41] Chapin III F S. The Mineral Nutrition of wild plants[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, **11**: 233-260.
- [42] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, **6**(33): 1441-1450.
- [43] Tessier J T, Raynal. 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.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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