

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.hjx.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]。就目前研究进展来看,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,以期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。

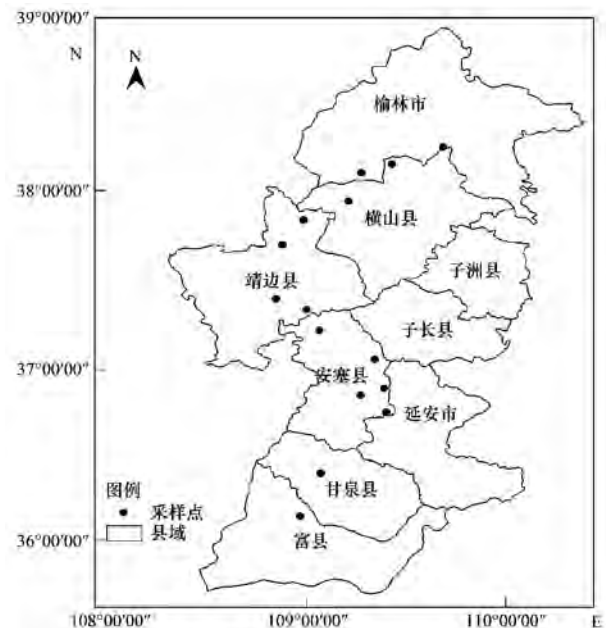


图1 研究区样点分布

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, 在每个样地按“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 筛以备用元素分析. 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($R^2 = 0.085$, $P = 0.723$).

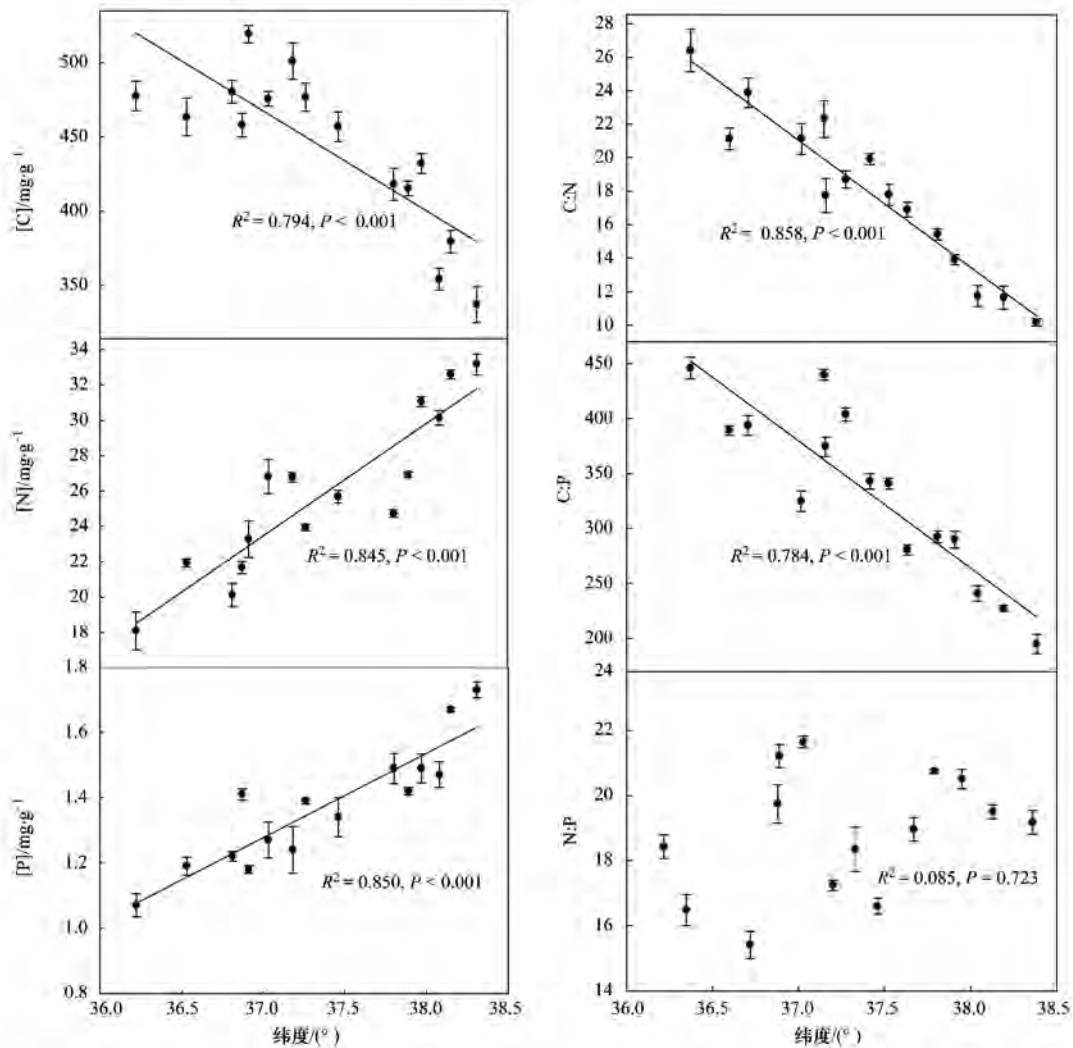


图 2 植物叶片化学计量学特征随纬度的变化规律

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 ~ 17.27 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、N (0.12 ~ 1.72 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、P (0.48 ~ 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 ~ 8.01 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、N (0.11 ~ 1.11 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、P (0.49 ~ 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 ~ 4.69 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、N (0.19 ~ 0.51 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、P (0.48 ~ 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 ($P < 0.01$).

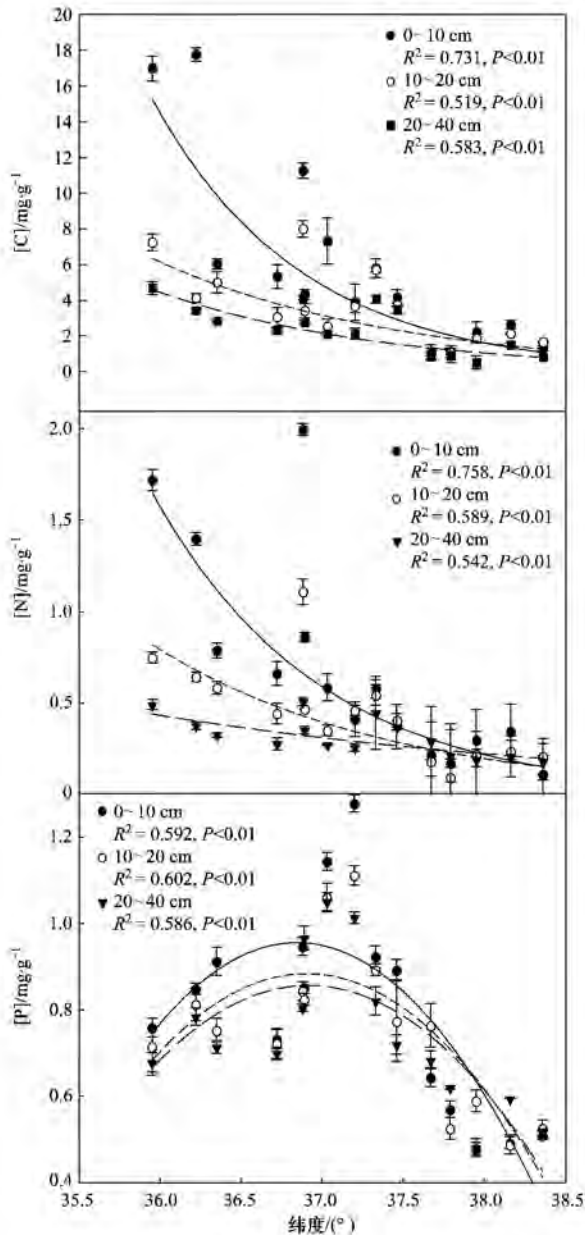


图3 不同土层土壤 C、N、P 含量随纬度的变化规律

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

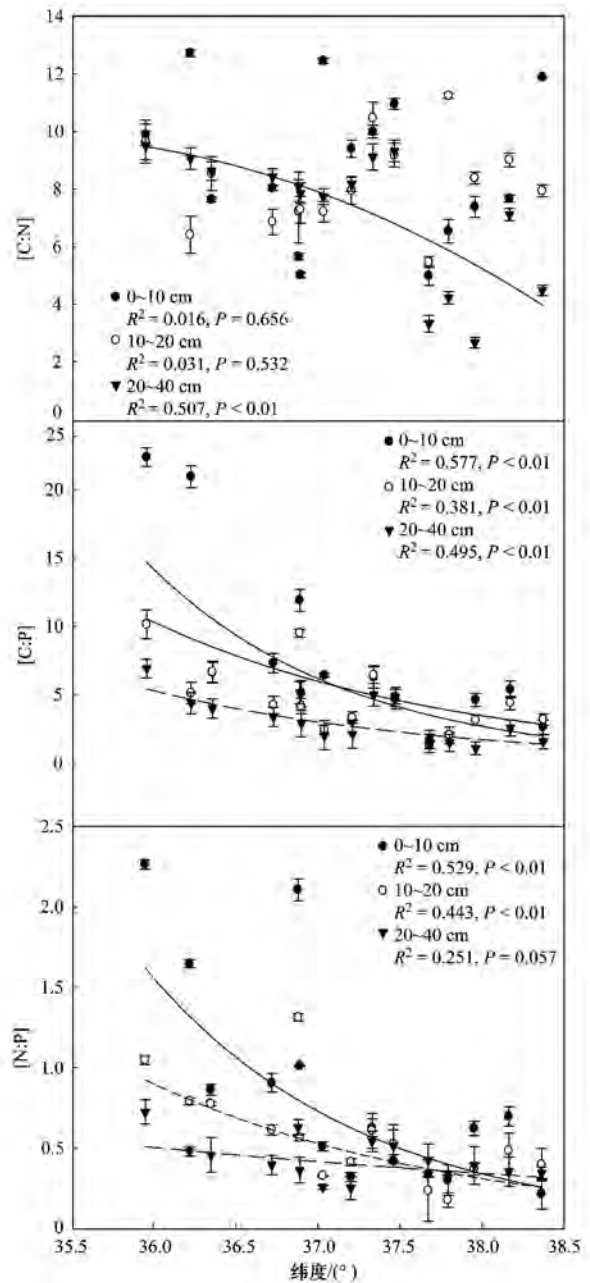


图4 土壤 C:N、C:P、N:P 含量随纬度的变化规律

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,与顾大形等^[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, 林鹂. 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] 顾大形, 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.