

DOI: 10.5846/stxb201904010629

李佳佳 樊妙春,上官周平.黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征.生态学报 2019, 39(21): 7996–8002.

Li J J, Fan M C, Shang-Guan Z P. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica 2019, 39(21): 7996–8002.

黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

李佳佳¹ 樊妙春²,上官周平^{1,*}

1 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100

摘要: 为了解黄土高原南北样带刺槐林土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征,采集了黄土高原南北样带上12个典型样点的刺槐林土壤,测定了土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量并分析其生态化学计量特征。结果表明:刺槐林土壤SOC、TN、TP含量均随降水量降低而降低,且土壤SOC与TN的空间变化具有一致性;土壤SOC、TN、TP及其生态化学计量比与降雨量呈显著正相关($P < 0.05$),且TN、C:P、N:P与土壤含水量也呈显著正相关($P < 0.05$)。

关键词: 刺槐; 化学计量学; 土壤; 降水; 黄土高原

Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau

LI Jiajia¹, FAN Miaochun², SHANGGUAN Zhouping^{1,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: This study collected 12 typical soil samples from the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau to understand the ecological stoichiometric characteristics of its soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P). The contents of soil organic carbon (SOC), total N, and total P were determined, and their ecological stoichiometric characteristics were analyzed. The results showed that the content of SOC, total N, and total P in the *Robinia pseudoacacia* forest decreased with a decrease in precipitation, including the spatial variation in the SOC and total N. The soil C, N, P, and their ecological stoichiometries were significantly positively correlated with precipitation ($P < 0.05$), and there was a significantly positive correlation between the total N, C:P, N:P, and soil water content ($P < 0.05$).

Key Words: *Robinia pseudoacacia*; stoichiometry; soil; precipitation; Loess plateau

生态化学计量学贯穿生态系统各个层次^[1],交叉融合多学科^[2],广泛应用于凋落物分解^[3-4]、氮固定^[5]、群落结构动态^[6]及全球生物地球化学循环^[7]等领域,其逐渐完善、扩展成为许多生态系统结构与功能研究的工具。土壤碳:氮:磷(C:N:P)是反应土壤内部C、N、P循环和土壤生态系统结构与功能变异性的指标,有利于进一步了解相关生态过程对全局变化的响应。CO₂增加、气候变暖、营养富集化和生物入侵^[8]不断促

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0501605);国家自然科学基金项目(41771549);中国博士后科学基金(2018M633601);陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-057)

收稿日期:2019-04-01; 网络出版日期:2019-09-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

进全球变化,引起全球变化的因子与生态化学计量学有关^[9]。因此,研究气候变化和营养动态模型等对生态化学计量的影响成为生态学、地学和农学研究的热点^[10]。

黄土高原地区生态环境脆弱,土壤侵蚀和水土流失严重,植被恢复、调整土地利用方式、改进耕作技术等是改善黄土高原生态环境和水土保持的重要举措^[11-12]。刺槐具有涵养水源、保持水土、抗逆性强、速生性好等特点^[13],其生长状况在以水分为限制性因素的黄土高原不同区域差异较大^[14]。从1970年以来,刺槐在黄土高原地区大面积栽植,对黄河流域生态恢复与水土保持发挥了重要作用^[15]。目前,关于黄土高原刺槐的相关报道较多,如不同纬度、植被类型对土壤理化性质的影响^[16-18]、不同植被生态效应^[19]等,而关于黄土高原水分空间分布格局对刺槐林地土壤C、N、P影响还亟待加强。随着全球气候变暖,区域降水格局表现出明显的分异特征^[20],降雨格局的改变影响一些关键生态系统过程,特别表现在脆弱生态系统^[21],与此同时黄土高原刺槐人工林因土壤干燥化加剧,其林分稳定性和生态功能也将面临挑战^[22]。降雨是制约黄土高原土壤水分特征的主要因素,对刺槐生长和土壤C、N、P循环具有重要影响。探讨黄土高原南北样带刺槐林土壤C、N、P生态化学计量特征,对刺槐林的有效经营和水土保持具有重要现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原地区(34.303°—39.183°,108.067°—110.629°),属大陆性气候,平均气温8.8—13.4℃,年降雨量500 mm左右,且从南向北逐渐较少,全年雨量少且雨季集中,气候干燥,蒸发量大,无霜期短,加上大风、霜冻等自然灾害现象频繁,植被生长的环境条件较差。该区域地表破碎,沟壑纵横,大部分地区坡度都在15°以上。刺槐属于速生、耗水树种,具有生长快、繁殖容易和适应强,是黄土高原主要的人工造林树种。

表1 研究样地基本环境特征

Table 1 Basic environmental characteristics of the sampling area

采样点 Sampling site	年均降雨量 Precipitation/mm	年均温度 Average annual temperature/℃	纬度 Latitude/N	海拔 Altitude/m	土壤质地 Soil texture
杨凌	635.0	12.90	34°30'26.52"	464	砂黏土
泾阳	504.2	13.46	34°42'31.4"	660	砂黏土
铜川	594.2	10.81	35°00'59.8"	867	砂黏土
黄陵	597.3	9.40	35°33'56.5"	945	砂黏土
富县	532.8	9.49	35°59'56.6"	1024	砂黏土
延安	500.0	9.70	36°40'4.4"	1271	砂黏土
延川	470.4	10.75	36°55'33.7"	921	砂黏土
绥德	410.5	10.09	37°30'47.7"	935	砂黏土
米脂	421.9	9.50	37°51'37.3"	1110	砂土及壤砂土
榆林	383.5	8.78	38°11'7.8"	1185	砂土及壤砂土
神木	410.3	9.16	38°49'18.3"	1267	砂土及壤砂土
府谷	406.2	9.49	39°18'27.8"	1262	砂土及壤砂土

本研究在黄土高原南北样带设置12个代表性较强的样点,分别为杨凌、泾阳、铜川、黄陵、富县、延安、延川、绥德、米脂、榆林、神木和府谷等(表1),跨越半湿润和半干旱气候区。

1.2 样品采集与测定

样品采集于2018年8月植物生长旺盛时期,采样点分布在黄土高原南北水分梯度带上,在每个样点选择18—23年的刺槐成熟林为研究对象,每个研究样点设置3个20 m×20 m样方,坡度和坡向大致相同,每个样方内随机选取3棵长势较好的刺槐,采集其林下0—20 cm土层的土壤样品,挑出植物、细根、石块等杂物后,

混匀、风干、过筛后装入自封袋,供室内分析使用。

土壤含水量采用烘干法测定,土壤 pH 采用水土比例 1:2.5 玻璃电极法测定,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定,全氮(TN)采用凯氏定氮法进行测定,全磷(TP)采用高氯酸-硫酸消解钼锑抗比色法测定^[23]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 对实验数据进行前期统计处理,运用 R(version 3.5.2) 对数据进行回归分析及相关性分析。用变异系数表示土壤 SOC、TN、TP 及其化学计量比的变异情况。Jobbage 等指出变异系数 $C.V \leq 10\%$ 为弱变异, $10\% \leq C.V \leq 100\%$ 为中等变异, $\geq 100\%$ 为强变异^[24]。变异系数具体计算公式如下式:

$$C.V = (SD \div MN) \times 100\%$$

式中, $C.V$ 表示变异系数, SD 表示标准偏差, MN 表示平均值。

采用 Canoco 5.0.2 进行 PCA 分析,分析土壤理化性质和生态化学计量学之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同降雨条件下土壤 C、N、P 化学计量特征

黄土高原南北样带刺槐林土壤 SOC 含量变化范围 1.74—33.80 g/kg, 均值 9.95 g/kg, 变异系数为 96.18% (图 1), 降雨量在 500—600 mm 之间先增加后降低。TN 含量变化范围 0.21—0.91 g/kg, 均值 0.42 g/kg, 变异系数为 40.48%, 与土壤 SOC 变化具有一致性。TP 含量变化范围 0.24—0.71 g/kg, 均值 0.11 g/kg, 变异系数为 23.40%, 总体呈下降趋势, 变化幅度较小。C:P 变化范围 3.89—85.45, 均值 20.98, 变异系数为 102.62%; C:N 变化范围 4.83—70.85, 均值 22.01, 变异系数为 87.01%; C:P 变化范围 0.50—1.79, 均值 0.91, 变异系数为 36.26%。统计结果显示, 土壤 SOC、TN、TP 属于中等变异, 且 SOC 变异性强于 TN 和 TP, C:P 属于强变异, C:N、C:P 属于中等变异, C:N 和 C:P、C:P 变化趋较为一致, 均随降雨量的降低而降低。

2.2 土壤理化性质与土壤生态化学计量学主成分分析

对土壤理化性质与土壤生态化学计量进行主成分分析, 提取 4 个主成分, 累积贡献率达到 99.18%, 其中第一主成分(PC1) 贡献率 53.67%, 第二主成分(PC2) 贡献率 18.52%, 所以提取前两个主成分进行分析, 以

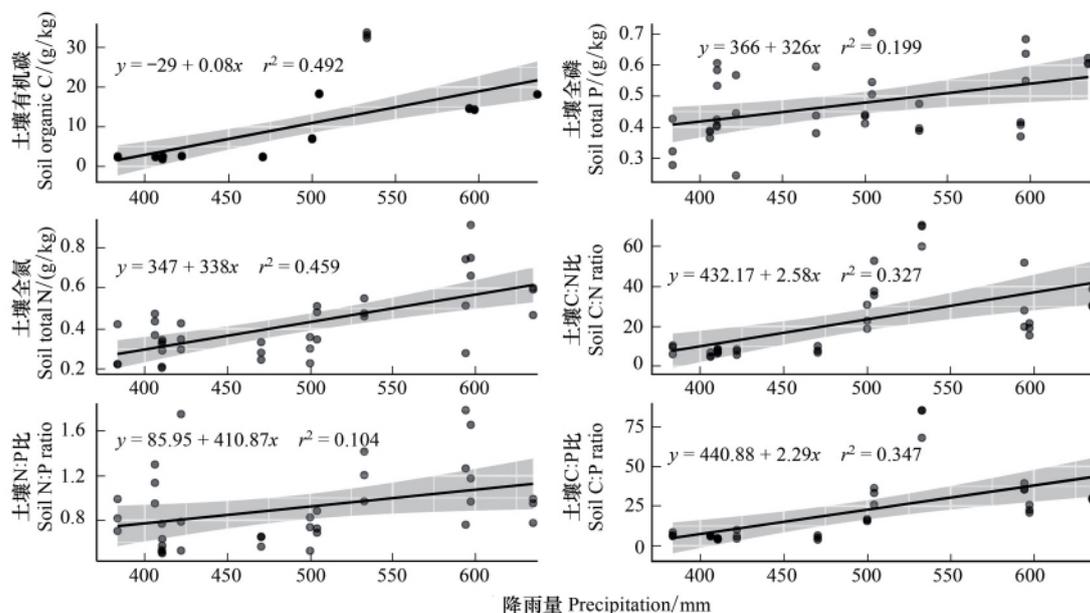


图 1 不同降雨量下刺槐林土壤 C、N、P 化学计量特征

Fig.1 Characteristics of soil C, N and P stoichiometry in *Robinia pseudoacacia* forest under different precipitation

PC1 为横轴,以 PC2 为纵轴,以土壤理化性质和生态化学计量在两个主成分上的得分为坐标作图,得到土壤理化性质与土壤生态化学计量学主成分分析图(图 2)。

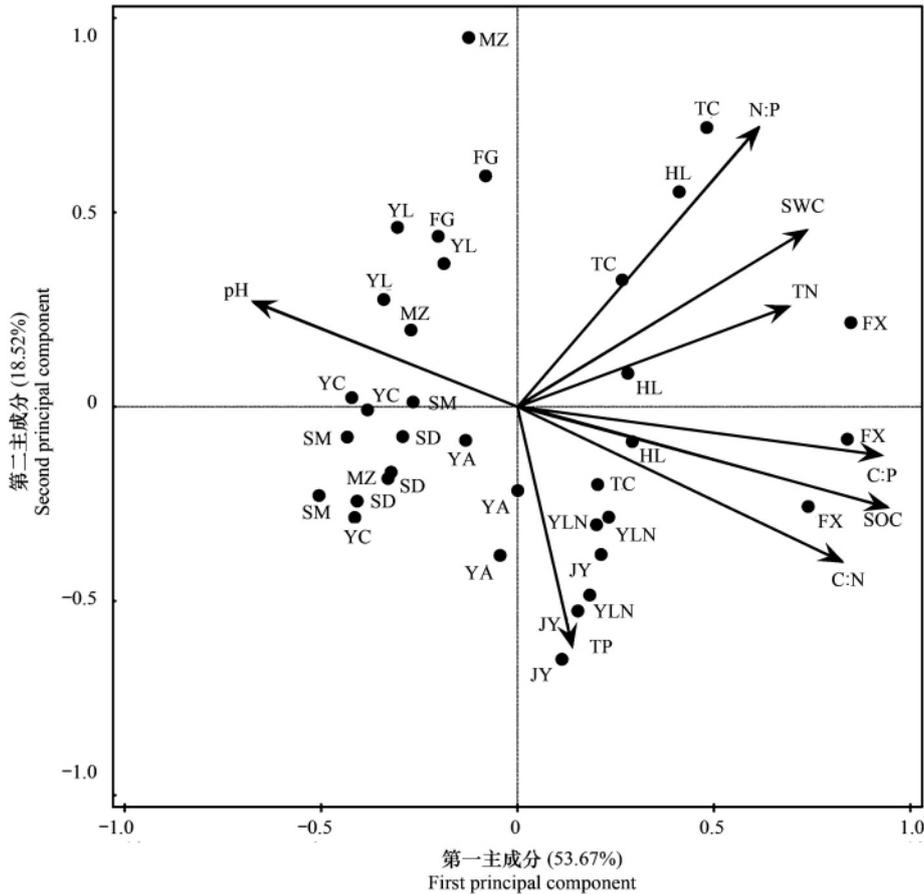


图 2 土壤理化性质与土壤生态化学计量之间的关系

Fig.2 Ordination plots of principal component analysis (PCA) result showing the relationship between soil physical and chemical properties and ecological stoichiometry

SOC, 土壤有机质 Soil organic carbon; TN, 土壤全氮 Soil total nitrogen; TP, 土壤全磷 Soil total phosphorus; SWC, 土壤含水量 Soil water content; YLN: 杨凌, JY: 泾阳, TC: 铜川, HL: 黄陵, FX: 富县, YA: 延安, YC: 延川, SD: 绥德, MZ: 米脂, YL: 榆林, SM: 神木, FG: 府谷

土壤 SOC、TN、TP、C:P、C:N、土壤含水量与第一序轴呈正相关, pH 与第一序轴呈负相关。从箭头连线夹角所示, 土壤 SOC、TP、C:N、C:P 相关性较强, 其中 SOC 与 C:P 相关性强于 C:N, TN 与 C:P、土壤含水量相关性较大。

2.3 土壤生态化学计量与环境因子相关性分析

土壤 SOC 含量与纬度、海拔呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与降雨量、温度呈显著正相关, TN 与海拔、纬度呈显著负相关, 与降雨、土壤含水量呈显著正相关 ($P < 0.05$) (图 3)。TP 与纬度和海拔呈显著负相关, 与降雨量、温度呈显著正相关 ($P < 0.05$), C:N、C:P、C:P 与降水呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与纬度、海拔呈显著负相关, C:P 与土壤含水量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 南北样带刺槐林土壤 C、N、P 生态化学计量影响因素分析

本研究中, 土壤均呈弱碱性, 土壤 pH 与降雨量显著呈负相关, 土壤 SOC 和 TN 与降雨量呈显著正相关 (图 3)。土壤碳氮的变化具有一致性, 呈现从南向北逐渐降低, 这与曾全超、张向茹、涂明夏等对黄土高原刺

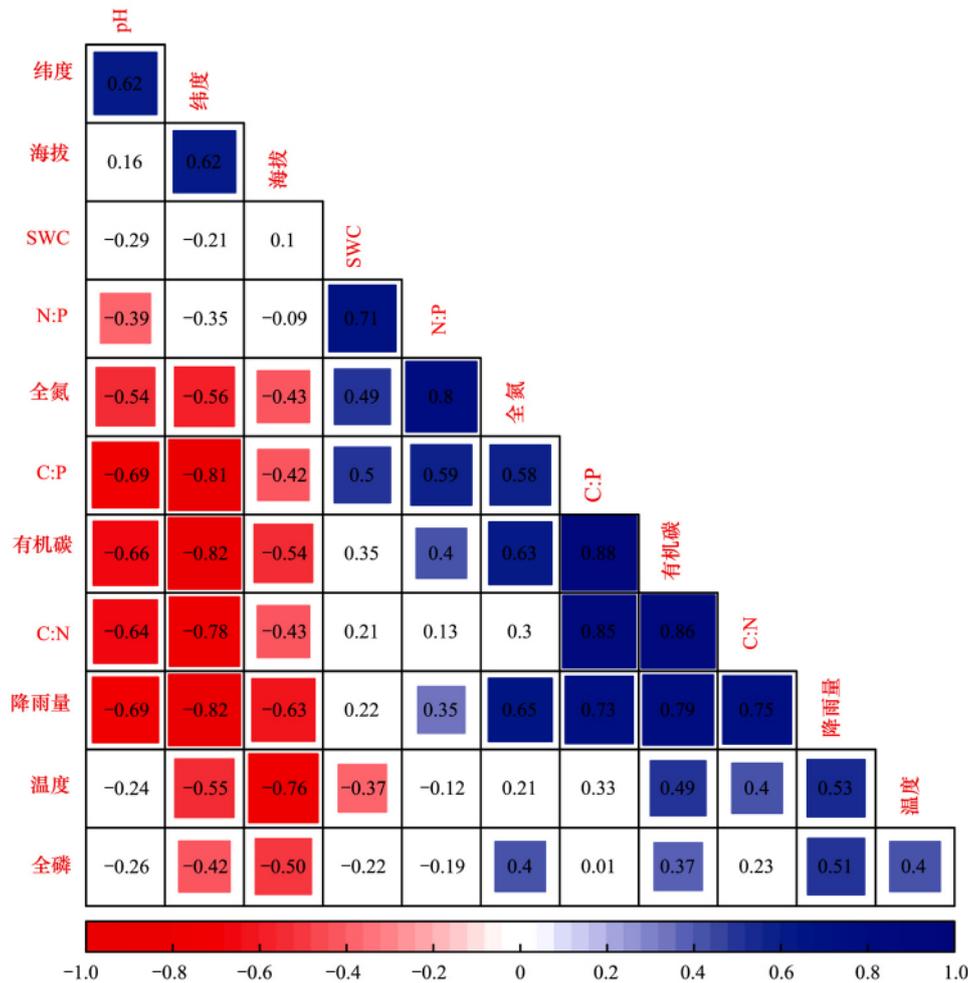


图3 环境因子和土壤理化性质相关性分析

Fig.3 The correlation relationship between environmental factors and soil physical and chemical properties

红色表示显著负相关,蓝色表示显著正相关,白色表示不显著($P < 0.05$)

槐林土壤的碳氮研究相似^[17 25-26]。这主要是因为土壤全氮来源于土壤植物残体分解与合成的有机质,土壤氮素水平在一定程度上决定有机碳含量^[27],研究区向北推进降水量降低,土壤含水量和植物繁茂程度降低,生物量和地表植被枯落物逐渐降低。相关研究表明植被生长有利土壤养分积累^[28]。王宝荣等研究结果也表明,植物类型对土壤养分含量影响很重要^[29],另外,张晗等认为较高的土壤含水量条件下,嫌气性微生物的固氮能力强,有助于土壤C、N矿化积累^[30],向北推进,气候干旱,土壤含水量降低,嫌弃性微生物固氮能力降低,同时土壤砂粒也会降低对有机质的吸附能力^[26]等。土壤SOC变异系数高达94.18%,强于全氮和全磷,这与张向茹研究结果相同^[25],土壤全磷变异较小,变异系数为23.40%。土壤磷主要受气候、土壤母质^[31]影响。气候通过淋溶和降雨作用影响土壤磷含量,磷含量主要来源于土壤母质。研究区域从南向北,降雨量逐渐减少,土壤含水量降低,土壤质地粘性减弱砂性增强,养分含量逐渐减少,随着海拔升高,表土冲刷在低海拔沉积,土壤C、N、P表现从南向北逐渐降低^[32]。

3.2 南北样带刺槐林土壤C、N、P生态化学计量对环境因子的响应

本研究结果表明土壤C:N、C:P、C:P随降雨量的减少呈现降低趋势,土壤SOC、TN、TP也均随降雨量降低而降低,TN、TP的变化幅度较小,C:P、C:N变化主要由SOC变化引起,TN变化引起C:P变化。土壤C、N、P与降水呈显著正相关(图3)。降雨量减少使土壤含水量降低和刺槐耗水量下降,表现植物对环境因子的适应,但最终导致刺槐生存力下降^[20],土壤C:N:P与植物生长、养分策略具有一定关系。另外,前人研究发现

干旱胁迫也会使微生物数量和活性降低^[33], 降雨量适当增加不仅可以缓解土壤水分限制, 还可以提高土壤 N 的矿化速率和有效性, 有利于微生物生长和繁殖^[34-35]。土壤含水量与土壤养分动态和植物光合生理过程等密切相关^[36]。就黄土高原南北样带来说, 南部是半湿润区, 高温多雨, 北部是半干旱气候区, 气候干冷。在未来气候变化背景下, 降雨会促进干旱和半干旱地区植物生长^[8], 高温多雨可能会加速土壤枯落物分解, 缩短土壤-植物-枯落之间的养分循环速率, 加速土壤 N 淋失^[37], 降雨增加还通过改变土壤含水量和土壤 pH 来影响微生物群落结构和酶的活性, 从而影响土壤 C、N、P 的矿化和积累过程^[26]。另外, 从纬度角度来看, 水热条件在不同纬度分配状况不同, 进而影响土壤 C、N、P 的养分转化和迁移。研究区土壤碳氮磷均表现一致的变化规律, 随纬度增加而降低, 这与曾全超等研究一致^[17]。但是在南北样带不同降雨条件土壤-植物之间的营养元素循环还不清楚, 有待深入研究。

4 结论

黄土高原南北样带降雨量对刺槐林土壤 C、N、P 具有显著影响, 土壤 pH 及含水量从南向北逐渐增加。土壤有机碳、全氮、全磷含量均随降水量减少而降低, 土壤有机碳与全碳的空间变化具有一致性。在南北样带刺槐林土壤 C:P 与降水相关性较小, 其变异性也较小, 相比土壤 C:N、C:P 变化较大, 随着降水的减少显著下降。未来需进一步开展降雨量变化对植物-土壤系统 C、N、P 生态化学计量关系影响机理的研究, 并系统探讨土壤 C、N、P 化学计量平衡关系与物种分布之间的协同关系。

参考文献 (References):

- [1] 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. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [2] 程滨, 赵永军, 张文广, 安树青. 生态化学计量学研究进展. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [3] Güsewell S, Gessner M O. N:P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. Functional Ecology, 2009, 23(1): 211-219.
- [4] Manzoni S, Trofymow J A, Jackson R B, Porporato A. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. Ecological Monographs, 2010, 80(1): 89-106.
- [5] Sañudo-Wilhelmy S A, Kustka A B, Gobler C J, Hutchins D A, Yang M, Lwiza K, Burns J, Capone D G, Raven J A, Carpenter E J. Phosphorus limitation of nitrogen fixation by *Trichodesmium* in the central Atlantic Ocean. Nature, 2001, 411(6833): 66-69.
- [6] Andersen T, Elser J J, Hessen D O. Stoichiometry and population dynamics. Ecology Letters, 2004, 7(9): 884-900.
- [7] Hessen D O, Ågren G I, Anderson T R, Elser J J, De Ruiter P C. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. Ecology, 2004, 85(5): 1179-1192.
- [8] IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Reich P B, Hungate B A, Luo Y Q. Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2006, 37: 611-636.
- [10] 林永静, 武梦娟, 卢同平, 张文翔, 牛洁. 中国生态化学计量学研究热点的可视化分析. 生物学杂志, 2018, 35(2): 63-66.
- [11] Zhu T X. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. Geomorphology, 2012, 153-154: 144-155.
- [12] Bullock A, King B. Evaluating China's slope land conversion program as sustainable management in Tianquan and Wuqi counties. Journal of Environmental Management, 2011, 92(8): 1916-1922.
- [13] 刘秉正, 王幼民, 李凯荣, 肖智, 司玉冰. 人工刺槐林改良土壤的初步研究. 西北林学院学报, 1987, 2(1): 48-57.
- [14] 薛敏, 张文辉, 杜盛. 黄土高原刺槐群落优势植物水分生理生态研究. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 27-34.
- [15] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究. 林业科学, 2004, 40(1): 84-91.
- [16] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 安韶山. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [17] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 李娅芸, 程曼, 安韶山. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870-879.
- [18] Fu X L, Shao M A, Wei X R, Horton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China.

- Geoderma, 2010, 155(1/2): 31-35.
- [19] 张含玉,方怒放,史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [20] 何秋月,闫美杰,张建国,杜盛. 黄土高原半湿润区刺槐树干液流对人工截留降雨输入及环境因子的响应. 植物生态学报, 2018, 42(4): 466-474.
- [21] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,张莉,任玉玉,徐影,张华,战云健,王涛,郭艳君,陈峪,唐国利,郭军. 中国大陆降水时空变异规律-III. 趋势变化原因. 水科学进展, 2016, 27(3): 327-348.
- [22] 黄菊莹,余海龙,刘吉利,马飞,韩磊. 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. 生态学报, 2018, 38(15): 5362-5373.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Jobbágy E E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [25] 张向茹,马露莎,陈亚南,杨佳佳,安韶山. 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. 土壤学报, 2013, 50(4): 818-825.
- [26] 涂夏明,曹军骥,韩永明,沈振兴,张宝成. 黄土高原表土有机碳和无机碳的空间分布及碳储量. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 114-118.
- [27] 党亚爱,李世清,王国栋,邵明安. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [28] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China. Catena, 2011, 86(2): 110-116.
- [29] 王宝荣,杨佳佳,安韶山,张海鑫,白雪娟. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响. 应用生态学报, 2018, 29(1): 247-259.
- [30] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.
- [31] 汪涛,杨元合,马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(6): 945-952.
- [32] 邱扬,傅伯杰,王军,陈利顶. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子. 自然科学进展, 2004, 14(3): 294-299.
- [33] Schimel J P, Scott W J, Killham K. Changes in cytoplasmic carbon and nitrogen pools in a soil bacterium and a fungus in response to salt stress. Applied and Environmental Microbiology, 1989, 55(6): 1635-1637.
- [34] Xu Z Z, Hou Y H, Zhang L H, Liu T, Zhou G S. Ecosystem responses to warming and watering in typical and desert steppes. Scientific Reports, 2016, 6: 34801.
- [35] 杨山,李小彬,王汝振,蔡江平,徐柱文,张玉革,李慧,姜勇. 氨水添加对中国北方草原土壤细菌多样性和群落结构的影响. 应用生态学报, 2015, 26(3): 739-746.
- [36] 卢同平,张文翔,牛洁,林永静,武梦娟. 典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究. 土壤学报, 2017, 54(3): 682-692.
- [37] 杜满义,范少辉,刘广路,封焕英,郭宝华,唐晓鹿. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征. 植物生态学报, 2016, 40(8): 760-774.