黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征

尹秋龙[1], 寇 萌[2], 焦菊英[2], 岳 明[1]

(1. 西北大学 生命科学学院, 陕西 西安 710069; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 对黄土丘陵沟壑区不同群落土壤养分及化学计量进行研究,为该区的植被恢复提供一定的理论依据。[方法] 测定土壤的有机碳、全氮、全磷含量,计算 C∶N,C∶P,N∶P,进行差异显著性检验。[结果] 研究区土壤有机碳和全氮含量属于 6 级,全磷含量属于 4 级,均为养分含量较低的级别;0—10 cm 土层土壤养分含量大于 10—20 cm 土层;不同群落之间 P 含量差异不显著,柠条群落的 C,N 含量最高,铁杆蒿群落的 C,N 含量最低;柠条群落 C∶N 与其他群落(铁杆蒿群落除外)差异不显著,C∶N 保持相对稳定;铁杆蒿群落和刺槐群落的 C∶P 较低,土壤 P 的有效性较高。[结论] 不同群落的生物量和盖度等特征不同,导致土壤养分有所差异;不同群落对土壤 C,N,P 的补充和吸收利用能力不同,导致化学计量特征有所不同。

关键词: 土壤养分; 化学计量; 植物群落; 黄土丘陵沟壑区

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2017)01-0062-05 **中图分类号**: S158.3, X171.4

文献参数: 尹秋龙, 寇萌, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 062-066. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.011; Yin Qiulong, Kou Meng, Jiao Juying, et al. Characteristics of soil nutrients and stoichiometry in different communities in hilly-gullied region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 062-066. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.011

Characteristics of Soil Nutrients and Stoichiometry in Different Communities in Hilly-gullied Region of Loess Plateau

YIN Qiulong[1], KOU Meng[2], JIAO Juying[2], YUE Ming[1]

(1. *College of Life Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi* 710069, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] The study aims to analyze the characteristics of soil nutrients and stoichiometry in different communities in hilly-gullied region of Loess Plateau, and to provide theoretical basis for vegetation restoration. [Methods] Soil organic carbon, total phosphorous and total nitrogen were measured, and C∶N, C∶P and N∶P were calculated. Significance test was done in data analysis. [Results] The contents of soil organic carbon and total nitrogen were at the 6th level, total phosphorous was at the 4th level. Soil nutrient contents of the study area were at a lower level. Soil nutrient contents of 0—10 cm were higher than that of 10—20 cm. The total phosphorous contents in different communities were not significant. The contents of organic carbon and total nitrogen in *Caragana korshinskii* dominated community were the highest, and the contents in *Artemisia gmelinii* dominated community were the lowest. The C∶N in *Caragana intermedia* dominated community had no significant difference with other communities, except *A. gmelinii* dominated community. The C∶P of *A. gmelinii* dominated community and *Robinia pseudoacacia* dominated community were lower than other communities. [Conclusion] The biomass and coverage of different communities were

收稿日期: 2016-05-31 **修回日期**: 2016-06-13

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目"西北黄土高原区水土保持生态效应监测与评价技术研究"(201501045); 国家自然科学基金面上项目"黄丘区坡面退耕与淤地坝对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机理"(41371280), "黄土高原森林次生演替过程中基于功能性状的群落构建机制的演变"(41571500)

第一作者: 尹秋龙(1988—),男(汉族),山东省济南市人,博士研究生,研究方向为生态学。E-mail: yinql1988@163.com。

different, and it led to the differences of soil nutrients. The supply and absorption abilities of C, N and P were different across communities, and it led to the differences of stoichiometric characteristics.

Keywords: soil nutrients; stoichiometric; plant communities; hilly-gullied region of Loess Plateau.

土壤和植被是生态系统的重要组成部分,两者之间具有密切的相互作用。土壤是陆地植物生长的基础,为植物提供生长所需的各种养分,对植物群落的发生和演替、群落的物种组成和多样性以及生态系统的结构和功能具有重要影响[1-3];而植被在生长过程中又可通过根系分泌物及枯落物分解等过程影响土壤的养分状况和理化性质[4]。生态化学计量学综合了生物学、化学和物理学等学科的基本原理,为研究生态系统中 C,N,P 等多重营养元素的耦合关系提供了一种综合方法[5]。近年来,中国生态化学计量学发展迅速,众多学者在不同时空尺度对植物叶片和枯落物的生态化学计量做了大量研究,而对不同植物群落土壤养分化学计量的研究相对较少[6-7]。研究不同植物群落的土壤养分及化学计量特征,可以揭示不同群落土壤养分的可获得性及各营养元素的平衡机制[7],对于认识群落与土壤养分之间的关系具有重要意义。

黄土丘陵沟壑区,土壤侵蚀剧烈,土壤养分流失严重,植被恢复与重建是改善该区土壤质量和治理水土流失的重要措施。生态建设的成效很大程度上取决于植被恢复过程中土壤质量的演化,土壤质量逐步提高并保持较高水平,退化的生态系统才能到达生态平衡[8]。经过多年的退耕还林(草)等生态工程的建设,该区植被得到了不同程度的恢复,形成了不同的群落类型。不同植物群落的土壤侵蚀程度不同,对土壤的吸收能力和归还能力也不同,从而导致不同群落间土壤养分的差异。目前,在黄土高原,关于土壤养分的研究多集中于退耕地恢复过程中及不同土地利用方式下土壤养分的变化[9-11];对化学计量的研究多集中于植物叶片和枯落物以及养分添加对化学计量的影响[12-15],对土壤化学计量的研究较少[7,16],而对不同群落土壤 C,N,P 生态化学计量的研究则更少。因此,本研究拟选取黄土丘陵沟壑区常见的 3 种草本群落(长芒草 *Stipa bungeana* 群落、铁杆蒿 *Artemisia gmelinii* 群落、白羊草 *Bothriochloa ischaemum* 群落)和 2 种人工林群落(刺槐 *Robinia pseudoacacia* 和柠条 *Caragana korshinskii*),分析不同群落间土壤 C,N,P 的养分特征及化学计量特征,以期揭示植物群落与土壤养分及化学计量之间的关系,为当地的植被恢复重建提供一定的理论依据。

1　研究方法

1.1　研究区概况

本文研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域(109°13′36″—109°16′03″E,36°46′42″—36°46′28″N),属于黄土丘陵沟壑区第二副区,流域面积 8.27 km^2,海拔1 010～1 431 m。该区在气候区划上属于温带半湿润气候向半干旱气候过渡地区,多年平均降水量 500 mm 左右[17],年日照时数 2 300～2 400 h,年均气温 8.8 ℃,年平均蒸发量 1 460 mm 左右[18]。流域植被属于暖温带落叶阔叶林向暖温带草原区过渡的森林草原区,天然森林已被破坏,以人工的刺槐和小叶杨(*Populus simonii*)为主;灌丛以柠条、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工灌丛和黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora davidii*)等天然灌丛为主;草原以铁杆蒿、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)、长芒草为主。土壤类型为黄绵土,土质疏松,水土流失严重。

1.2　样地设置与样品采集

土壤采集于 2013 年 8 月进行。每种植物群落选取 2～4 个样地,在样地中布设 3 个 2 m×2 m 草本样方,3 个 5 m×5 m 灌木样方和 1 个 10 m×10 m 乔木样方,记录样方内物种组成及物种的高度、盖度、密度等,并采集植物地上生物量,分析不同群落的组成、结构与数量特征(表 1)。在每个样方内按“S”型路线选择 5 个点,用土钻分别采集 0—10 和 10—20 cm 两层土壤,多点混合,去除土层上枯落物,装入布袋子中带回实验室,风干备用。

表 1　不同植物群落基本特征

群 落	样地数量	草本层盖度/%	地上生物量/(g·m^{-2})	物种丰富度	物种多样性
长芒草	3	23.67±7.10	55.34±5.08	14.43±1.68	2.52±0.10
铁杆蒿	3	21.00±5.29	78.51±17.69	11.62±2.23	2.07±1.23
白羊草	4	37.25±10.82	81.57±7.82	10.58±1.72	2.56±0.26
刺 槐	3	24.00±1.73	74.96±21.27	11.94±0.37	2.42±0.62
柠 条	2	58.13±14.13	102.99±25.16	12.74±1.74	2.41±0.37

1.3 样品测定

仔细去除土样中的动植物残体、石块等杂物，混匀、研磨、过筛。每个样品 3 个重复进行养分测定。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定，全氮采用凯氏定氮法测定，全磷采用高氯酸—硫酸消化，钼锑抗比色法测定[19]。

1.4 数据处理

本研究中土壤 C，N，P 比均采用质量比，采用 One-way ANOVA 和 LSD 进行差异显著性分析、Pearson 进行相关性分析，数据分析通过 PASW Statistics 18 软件包中相应程序进行，采用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤养分及化学计量基本特征

对所有样地的养分及化学计量进行平均(表 2)，可知研究区 0—20 cm 土壤有机碳的变化范围为 1.24～5.16 g/kg，平均值为 3.37 g/kg；全氮的变化范围为 0.30～0.60 g/kg，平均值为 0.41 g/kg；全磷的变化范围为 0.40～0.70 g/kg，平均值为 0.54 g/kg；C∶N的变化范围为4.11～11.03，平均值为 8.23；C∶P 的变化范围为3.14～10.71，平均值为 6.32；N∶P 的变化范围为0.54～1.14，平均值为 0.77。6 种指标的变异系数在 17.71%～34.80%，C∶P 的变异程度最大，P 的变异程度最小。

表 2 土壤养分及化学计量描述性统计

指标	均值/(g·kg^{-1})	标准差/(g·kg^{-1})	最小值/(g·kg^{-1})	最大值/(g·kg^{-1})	变异系数/%
C	3.37	1.08	1.24	5.16	32.06
N	0.41	0.08	0.30	0.60	20.84
P	0.54	0.10	0.40	0.70	17.71
C∶N	8.23	1.89	4.11	11.03	22.98
C∶P	6.32	2.20	3.14	10.71	34.80
N∶P	0.77	0.19	0.54	1.14	24.88

2.2 不同土层土壤养分特征

所有样地 0—10 和 10—20 cm 土层土壤有机碳含量的平均值分别为 3.80，2.95 g/kg，全氮为 0.44，0.37 g/kg，全磷均为 0.54 g/kg。土壤有机碳、全氮含量为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层，但两层之间的差异不显著(图 1，$p>0.05$，下同。)。

2.3 不同群落土壤养分及化学计量特征

由于 0—10 和 10—20 cm 土层土壤养分状况没有显著差异，因此对不同群落土壤的分析数据采用 0—20 cm 的平均值。对于土壤有机碳，柠条群落的含量为 4.98 g/kg，显著高于其他 4 种群落(图 2，$p<0.05$，下同。)；长芒草和白羊草分别为 3.81 和 3.85 g/kg，两者间差异不显著；刺槐为 2.67 g/kg，铁杆蒿最低，仅为 1.93 g/kg。土壤全氮与有机碳表现出相似的趋势，柠条的含量显著高于其他群落，为 0.58 g/kg；其次为白羊草群落，为 0.43 g/kg，与长芒草差异不显著；铁杆蒿最低，为 0.33 g/kg，且与刺槐和长芒草差异不显著。5 种群落土壤之间的全 P 含量差异均不显著，长芒草最高(0.62 g/kg)，白羊草和铁杆蒿最低(均为 0.47 g/kg)。

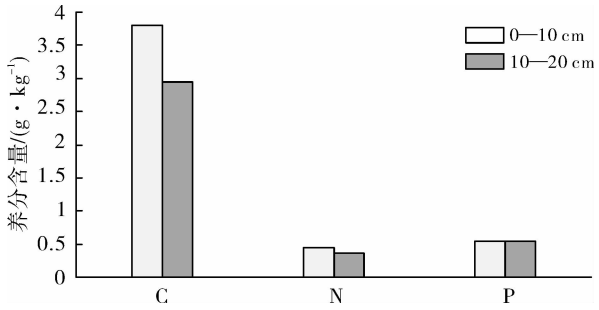


图 1 不同土层养分特征

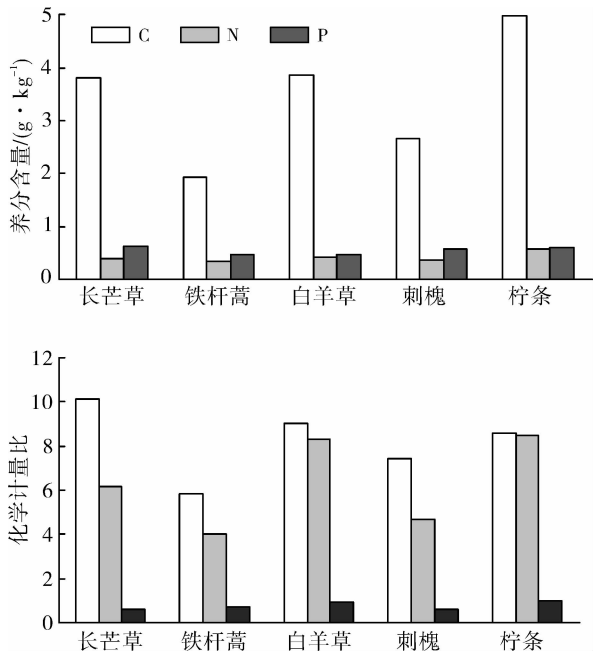


图 2 不同群落土壤养分及化学计量特征

长芒草群落土壤的 C∶N 最高，为 10.14，与白羊草群落和柠条群落差异不显著；铁杆蒿群落最低，为 5.82。对于土壤 C∶P，柠条群落最高，为 8.49；白羊草次之，为 8.34；铁杆蒿群落和刺槐群落较小，分别为 4.00，4.69，两者之间差异不显著。柠条群落和白羊草群落的 N∶P 较高，分别为 0.99，0.93；铁杆蒿群

落、刺槐群落和长芒草群落的 N∶P 较低,分别为 0.70,0.62,0.61,三者之间差异不显著(图 2)。

2.4　土壤养分与群落特征的相关性分析

为了解土壤与群落之间的关系,对土壤特征与群落特征进行相关性分析。发现草本层盖度与有机碳含量显著正相关,与全氮含量、C∶P 和 N∶P 表现出极显著的相关性。物种丰富度与全磷含量表现为显著正相关的关系。而地上生物量和物种多样性均未与土壤指标表现出显著的相关性(表 3)。

表 3　群落特征与土壤特征的相关性分析

土壤养分及化学计量	草本层盖度	地上生物量	物种丰富度	物种多样性
C	0.565*	−0.076	0.263	0.494
N	0.704**	0.178	−0.231	0.434
P	−0.316	−0.05	0.661*	0.438
C∶N	0.352	−0.173	0.484	0.460
C∶P	0.782**	0.047	−0.099	0.333
N∶P	0.743**	0.156	−0.647	−0.045

3　讨论与结论

(1) 黄土丘陵沟壑区土壤养分流失严重,该区的土壤养分水平对于植被恢复具有重要意义。根据全国第二次土壤普查养分分级标准,本研究中的土壤有机碳和全氮含量属于 6 级,全磷含量属于 4 级,均为养分含量较低的级别,这充分说明黄土丘陵沟壑区土壤养分的匮乏。本研究的土壤 C∶N 平均值为8.23,低于中国土壤 C∶N 的平均值(中国土壤 C∶N 平均为 10～12[20])。通常情况下,较低的 C∶N 对土壤微生物的活力具有促进作用,有助于增强土壤有机质的矿化作用[7,21],而本研究区的土壤 C,N 含量均处于较低水平,C∶N 的指示作用有待进一步研究。

表层土壤受外界环境和枯落物养分归还的影响较大,使得养分首先在表层土壤中聚集,然后再向下层迁移[22]。本研究中,0—10 cm 土层的土壤 C,N 含量均大于 10—20 cm 土层,这主要是由于土壤 C,N 元素受枯落物分解等生物因素的影响较大,上层土壤得到的养分补给较多;而 P 元素在上、下层土壤中的含量相同,这充分说明在本研究区内土壤磷素含量主要受黄土母质的影响,生物作用对其影响不大[23]。总体上 3 种元素在两层土壤之间的差异均不显著,这可能是由于本研究所采集的土壤深度较浅,在今后的研究中应增加土壤样品的采集深度。

(2) 研究表明植被类型对土壤养分有重要的影响,不同植物群落的根系活动深度不同,对土壤养分的吸收深度和强度有所不同,不同植物对不同元素的选择吸收也不同,从而导致不同群落的土壤养分存在差异[7,10]。本研究中,柠条群落土壤的 C,N 含量均最高,这主要是由于柠条枝叶繁茂,枯落物较多,可以显著提高土壤有机碳含量;柠条为豆科灌木,根部具有大量的根瘤菌,可以固定空气中游离态氮,增加土壤氮含量[4]。此外,研究还发现柠条根系分泌的有机酸可以降低根际的 pH 值,活化根际土壤的难溶性养分,提高养分有效性,使其可以在贫瘠的土壤中旺盛生长,从而明显改善土壤养分状况[24]。本研究中柠条林下的草本层盖度(58%)为 5 种群落中最高的,较高的草本层盖度有助于降低土壤侵蚀,从而减少土壤养分的流失;较高的林下盖度也有助于提高群落抵抗外界干扰的能力,在夏季强降雨时,减少枯落物被冲走的量,这也是群落结构发挥作用的重要体现[25]。研究还发现地表植被的盖度越大,表层土壤获得的光照和热量就越少,有助于有机质的积累[11]。

刺槐也属于豆科植物,但其土壤养分状况却显著低于柠条群落,这可能主要是由于刺槐林下的草本层盖度较低的原因。通过相关性分析,本研究也确实发现了草本层盖度与 C,N 之间显著地正相关关系。此外,有研究发现刺槐人工林为高吸收、高归还、快速循环、养分浪费型,这种高的周转率可能会使土壤中的养分相对较低[26]。铁杆蒿群落的盖度在所研究的 5 种群落中最低,这可能是其土壤 C,N 含量最低的重要原因。此外,铁杆蒿枯死的地上部分大部分以立枯体的形式存在,减少了对土壤养分的归还。长芒草和白羊草均为禾本科植物,发达的须根系有助于改善土壤的物理性质,增加土壤团聚体含量,进而增强土壤抗蚀性,减少土壤养分的流失。

(3) 土壤 C∶N∶P 是土壤有机质(或其他成分)中 C 与 N,P 总质量的比值,是反映有机质构成、土壤质量及养分供给能力的一个重要指标[27]。其中 C∶N 是土壤质量的敏感指标,可以影响土壤中的 C,N 循环[28]。本研究中,虽然柠条群落的 C,N 含量均显著高于其他群落,但 C∶N 与其他群落(铁杆蒿除外)无显著差异。这验证了不同生态系统的土壤 C∶N 相对稳定这一结论[29]。草本层盖度与有机碳显著正相关、与全氮极显著正相关,而与 C∶N 没有显著的相关性,这也说明了 C∶N 的相对稳定性。研究表明,C,N 之间具有显著相关性,对环境的响应也几乎是同步的,两者作为结构性成分,其消耗和累计的过程存在相对固定的比值[7]。土壤 C∶P 可以用来表征 P 有效性的高低[30]。本研究中,铁杆蒿群落和刺槐群落的 C∶P 较低,而 5 种群落土壤的 P 含量差异不显著,说

明这两种群落土壤P的有效性较高。N∶P可以用作N饱和的诊断指标，用于确定养分限制的阈值[30]。本研究中，不同群落的N∶P在0.61～0.99，明显低于其他地区的研究结果[30]，这进一步验证了黄土丘陵沟壑区土壤N的缺乏。

综上所述，不同群落的结构特征不同，导致土壤养分及化学计量的差异；土壤养分是一个动态的变化过程，在研究土壤养分时应该从土壤养分的补给（枯落物、根系分泌物）和流失（植物的吸收利用、土壤侵蚀）两方面进行综合考量，并结合养分在生态系统中的流动过程，这样才能更加全面的认识土壤养分变化，在今后的研究中应加强这方面研究；应注重发挥土壤化学计量的指示作用，使植被对土壤的改善作用更有针对性。

[参 考 文 献]

[1] 温仲明，焦峰，刘宝元，等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报，2005，16(11)：2025-2029.

[2] 李从娟，雷加强，徐新文，等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤CNP的化学计量特征[J]. 生态学报，2013，33(18)：5760-5767.

[3] 焦峰，温仲明，焦菊英，等. 黄丘区退耕地植被与土壤水分养分的互动效应[J]. 草业学报，2006，15(2)：79-84.

[4] 从怀军，成毅，安韶山，等. 黄土丘陵区不同植被恢复措施对土壤养分和微生物量C，N，P的影响[J]. 水土保持学报，2010，24(4)：217-221.

[5] 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.

[6] 聂兰琴，吴琴，尧波，等. 鄱阳湖湿地优势植物叶片—凋落物—土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 生态学报，2016，36(7)：1898-1906.

[7] 朱秋莲，邢肖毅，张宏，等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报，2013，33(15)：4674-4682.

[8] 安韶山，黄懿梅，郑粉莉. 宁夏黄土区不同植物群落土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(2)：300-307.

[9] 焦峰，温仲明，焦菊英，等. 黄土丘陵区退耕地土壤养分变异特征[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(6)：724-730.

[10] 王国梁，刘国彬. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报，2002，22(1)：1-5.

[11] 巩杰，陈利顶，傅伯杰，等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报，2004，15(12)：2292-2296.

[12] 李鑫，曾全超，安韶山，等. 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[J]. 环境科学，2015，36(3)：1084-1091.

[13] 陈亚南，马露莎，张向茹，等. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征[J]. 生态学报，2014，34(15)：4412-4422.

[14] 王凯博，上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片C，N，P化学计量特征季节变化[J]. 生态学报，2011，31(17)：4985-4991.

[15] 安卓，牛得草，文海燕，等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C∶N∶P化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报，2011，35(8)：801-807.

[16] 曾全超，李鑫，董扬红，等. 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[J]. 自然资源学报，2015，30(5)：870-879.

[17] 王力，邵明安，张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J]. 应用生态学报，2004，15(3)：436-442.

[18] 王国梁，刘国彬，周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报，2003，18(5)：529-535.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000.

[20] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京：中国农业出版社，2000.

[21] 李红林，贡璐，朱美玲，等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报，2015，52(6)：1345-1355.

[22] 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.

[23] 巩杰，陈利顶，傅伯杰，等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. 水土保持学报，2005，19(1)：93-96.

[24] 安韶山，黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J]. 林业科学，2006，42(1)：70-74.

[25] 郝文芳，单长卷，梁宗锁，等. 陕北黄土丘陵沟壑区人工刺槐林土壤养分背景和生产力关系研究[J]. 中国农学通报，2005，21(9)：129-135.

[26] 刘增文，王乃江，李雅素，等. 森林生态系统稳定性的养分原理[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2006，34(12)：129-134.

[27] 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.

[28] 任书杰，曹明奎，陶波，等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展，2006，25(4)：58-67.

[29] 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.

[30] 杨阳，刘秉儒，杨新国，等. 荒漠草原中不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量特征[J]. 水土保持通报，2014，34(5)：67-73.