

植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异

刘帅楠¹, 李 广¹, 杨传杰¹, 杜佳圉¹, 徐万恒², 谢明君¹

(1.甘肃农业大学林学院,兰州 730070;2.甘肃农业大学信息科学技术学院,兰州 730070)

摘要:为探讨植被类型及生长季阶段对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响,揭示黄土丘陵区陆地生态系统养分限制及循环规律。以黄土丘陵区典型荒草地(Grassland)、苜蓿(*Medicago Sativa*)地、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)灌木地、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)林地、云杉(*Picea asperata*)林地作为研究对象,分析其 0—60 cm 土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及化学计量比特征在植被类型间及生长季阶段内的差异。结果表明:(1)全生长季下乔木林地土壤 SOC、TN、TP 含量不同程度地显著高于灌草地 0.7%~39.7% ($P<0.05$),且各植被类型土壤 SOC、TN 含量均随植被生长而逐渐降低,土壤 TP 含量在生长季末期有一定的储集;(2)全生长季下 5 种植被类型土壤化学计量比(C:N、C:P、N:P)均值分别为 24.70、77.56、4.26,其 C:N、C:P 均较全国平均值(12.3、61.0)偏大,而 N:P 较全国平均值(5.2)小;且该区灌木地土壤化学计量比与荒草地间均存在显著性差异,而乔木林地间土壤化学计量比及草地间土壤 C:P、N:P 间均无显著性差异;(3)土壤 C:N 在时间上具有较好的稳定性,同时各植被类型土壤化学计量比在生长季阶段间均表现为生长季旺期>生长季初期>生长季末期,但植被在生长季旺期下 N:P (6.37)及生长季末期下 C:P(40.84)与全生长季和全国均值的比较趋势相反。植被类型及生长季阶段对土壤养分及化学计量比特征均有一定的影响,同时黄土丘陵区植被生长受土壤 N、P 养分限制程度为 $N>P$,因此应根据植被类型及生长阶段实际情况,合理施加氮磷肥,进而有助于土壤养分分存留,加快生态修复进程。

关键词:黄土丘陵区;植被类型;生长季阶段;土壤碳氮磷;化学计量特征

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0343-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.06.046

Seasonal Variation of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry Under Different Vegetation Types in Loess Hilly Region

LIU Shuainan¹, LI Guang¹, YANG Chuanjie¹, DU Jianan¹, XU Wanheng², XIE Mingjun¹

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2.College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: In order to explore the effects of vegetation types and growing season stages on ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus, reveal the nutrient limitation and circulation law of terrestrial ecosystem in Loess Hilly Area, taking the typical grassland, *Medicago Sativa* land, *Hippophae rhamnoides* shrub land, *Xanthoceras sorbifolium* woodland and *Picea asperata* wood land as the research objects in Loess Hilly Area, we analyzed the contents of organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of the 0—60 cm soil layer and their stoichiometric ratio characteristics as well as the differences between vegetation types and growth season stages. The results showed that: (1) The contents of SOC, TN and TP of arbor forest land were significantly higher than those of shrub grassland (0.7%~39.7%) in the whole growing season ($P<0.05$), and the contents of SOC and TN of five vegetation types gradually decreased with the growth of vegetation. The content of TP had a certain accumulation at the end of growing season. (2) In the whole growing season, the mean stoichiometric ratios (C:N, C:P and N:P) of the five vegetation types were 24.70, 77.56 and 4.26, respectively. The C:N and C:P were larger than the national average (12.3, 61.0), while the N:P was smaller than the national average (5.2). There were significant differences in soil stoichiometric ratio between shrub land and wasteland, but there was no significant difference in soil stoichiometric ratio between arbor forest land and in soil C:P and N:P between grassland.

收稿日期:2021-06-24

资助项目:甘肃省重点研究发展计划项目(20YF8NA135);甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909);陇原人才专项(LRYCZ-2020-1)

第一作者:刘帅楠(1997—),男,河北邯郸人,在读硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:2298243583@qq.com

通信作者:李广(1971—),男,内蒙古化德人,教授,博导,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn

(3) The soil C : N had good stability in time. At the same time, the soil stoichiometric ratio of each vegetation type in the growing season stage followed the order of the peak period of the growth season>the early period of the growth season>the end of the growth season. However, the comparison trend of N : P (6.37) under the peak period of the growth season and C : P (40.84) under the end of the growth season were opposite to those of the whole growing season and the national average. Vegetation type and growing season stage had a certain impact on soil nutrients and stoichiometric characteristics. Meanwhile, vegetation growth in Loess Hilly Area was limited by soil N rather than soil P. Therefore, nitrogen and phosphorus fertilizer should be reasonably applied according to the actual situation of vegetation type and growing stage, so as to help soil nutrient retention and accelerate the process of ecological restoration.

Keywords: loess hilly region; vegetation type; growing season stage; soil carbon, nitrogen and phosphorus; stoichiometric characteristics

生态化学计量学是一门研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学^[1],为研究 C(碳)、N(氮)、P(磷)等元素在多种生态系统过程中的耦合关系及其元素比例变化规律提供了一种极有效的综合方法和重要工具^[2]。土壤是陆地生态系统的重要组成部分,通过改善土壤质量,能够有效促进植被恢复,稳定生态系统平衡^[3]。而 C、N、P 元素作为土壤养分的基础组成元素^[4],其含量变化能够显著影响到各生态系统的生产力及养分循环^[5],此外其化学计量比可以反映土壤内部 C、N、P 元素循环规律,具有重要的生态指示作用^[4]。因此,通过研究土壤 C、N、P 化学计量特征,对于调控土壤 C、N、P 元素循环及揭示土壤养分可获得性、平衡机制和相互制约关系具有重要意义^[6]。

黄土丘陵区位于我国北方干旱半干旱地区,该区水土流失严重,是我国生态环境最脆弱的地区之一^[3]。近年来,该区为有效防治水土流失,实现生态修复及其良性循环,实施了“退耕还林还草”工程^[7],使土壤处于一个扰动相对较少的恢复过程。而植被作为陆地生态系统中最重要的组成部分之一,在生态系统的物质循环和能量流动过程中起着不可或缺的作用^[5],同时不同的植被对外界水热条件敏感度差异较大,导致不同植被生长季阶段间的土壤养分变化规律存在明显差异^[8]。已有研究^[9]表明,不同的植被类型,其地表植被组成、分布状况、植物多样性及群落结构特征差异较大,进而影响到土壤结构^[10]、土壤水文物理性质^[11]及进入土壤的动植物残体和微生物量,致使不同植被类型间土壤养分特征及其对生态修复^[12]的能力差异显著;另外有学者^[13]认为,不同的生长季阶段将导致植被类型间土壤储水量差异明显,同时 Li 等^[14]对高山灌丛植被研究认为,受温度、降雨等因素的影响,导致不同生长季阶段下植被养分供应状况、光合性能等方面均存在较大的差异。

近年来,诸多学者对植被生态化学计量特征进行研究,但大多集中在植被土壤^[15]及植被—凋落物—

土壤系统^[16-18]上,有学者^[15]认为,土壤 C : N : P 化学计量比特征与植被类型密切相关,但因地表植被类型、气候特征及土壤初始养分的差异,导致土壤化学计量比对植被类型变化的响应规律相差较大^[16],同时土壤中的 C、N、P 储量及其化学计量比也可能影响地表植物群落组成^[15];温晨等^[17]对黄土小流域不同植被类型植物—土壤生态化学计量特征研究发现,植被生长受到 N、P 元素的共同限制,且土壤 C、N 元素含量在增长趋势上具有一致性,而高德新^[18]发现,N : P 可以很好地将植物与土壤紧密的联系在一起,植株叶片 P 元素显著影响到土壤 C、N 元素累积速率,同时植物器官又受到土壤 N 元素的影响。但基于生态化学计量学对不同植被类型的土壤养分季节变异研究鲜有报道,需进一步分析探讨。因此,本文以黄土丘陵区各生长季(生长季初期、生长季旺期、生长季末期)下荒草地(*Grassland*)、苜蓿(*Medicago Sativa*)地、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)灌木地、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)林地、云杉(*Picea asperata*)林地为研究对象,对其土壤化学计量特征进行研究,分析黄土丘陵区不同植被类型和其各生长季阶段下土壤 SOC、TN、TP 含量及化学计量特征变化规律,旨在进一步揭示黄土高原生态系统植被土壤养分循环状况,为黄土丘陵区恢复土壤肥力,更好地防治水土流失,植被修复类型优化选择及生态恢复提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区(103°52′—105°13′E,34°26′—35°35′N)水土保持科学研究所试验监测区。该区属黄河流域祖厉河水系关川河的支流——安家沟流域,流域面积为 8.56 km²,分水岭海拔 2 100~2 250 m,水土保持区划属黄土丘陵沟壑区第 V 副区^[19];该流域属典型中温带干旱、半干旱气候,年温差大,年平均气温 6.3 ℃,年平均降水量为

390.99 mm,主要集中在 7—9 月,年际变异大(变异系数为 18.5%),年均太阳辐射 $141.6\times 1.48\text{ kJ/cm}^2$,日照时间 2 476.6 h。该流域土壤类型以典型黄绵土为主,坡面黄土一般深 40—60 m。该区常年干旱缺水,植被稀少,自然植被以禾本科、豆科、菊科等草本植物为主,同时有少量灌木分布,如柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,乔木种主要为云杉(*Picea asperata*)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)等。

1.2 试验设置与样品采集

2019 年 7 月对研究区域进行野外调查,选择荒草地、苜蓿地、沙棘灌木地、文冠果林地及云杉林地 5 种不同植被类型的样地为试验区,对其土壤物理性质进行分析。各试验区随机选择 3 个小样地,其大小随植被类型而定:荒草地、苜蓿地、沙棘灌木地为 4 m×6 m,文冠果林地及云杉林地 10 m×10 m,各小样地之间间隔大于 5 m,样地土壤基本情况见表 1。2020 年分别在生长季初期(4 月末)、生长季旺期(7 月末)、生长季末期(10 月末)取样^[20],按照“S”形取样法在各小样地中选取 5 个代表性样点,按 0—10, 10—20,20—40,40—60 cm 层次,用土钻分层取土。去除土样中石块、根系等杂物后,同层土壤混匀为 1 个混合土样,然后装入无菌保鲜袋中标记,置于密封冰袋容器中冷藏,带回实验室于 4 ℃ 冰箱保存。

1.3 测定方法

土壤 pH 的测定采用电位法(土水比为 1 : 2.5),采用环刀法测定土壤物理性状指标(容重、最大持水量、总孔隙度);土壤有机碳采用重铬酸钾高温—外加热法;土壤样品于消煮管中经 H₂SO₄—H₂O₂ 高温消煮到乳白色,采用凯氏定氮法测定土壤全氮,采用钼锑抗比色法测定土壤全磷^[17]。

表 2 土壤 C、N、P 含量及化学计量比的双因素方差分析

因素	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
植被类型	22.755***	7.306***	27.743***	6.615***	7.947***	4.598**
生长季	46.680***	19.777***	112.437***	3.274*	151.237***	73.965***
植被类型×生长季	0.534	3.374**	18.178***	1.789	3.320**	7.643***

注:SOC 为土壤有机碳;TN 为全氮;TP 为全磷;C : N 为碳氮比;C : P 为碳磷比;N : P 为氮磷比;* 表示 $P<0.05$ 的显著水平;** 表示 $P<0.01$ 的显著水平;*** 表示 $P<0.001$ 的显著水平。下同。

从图 1 可以看出,5 种植被类型土壤 SOC、TN、TP 含量在全生长季下均表现出乔木林地(文冠果林地、云杉林地)显著高于灌草地(沙棘灌木地、苜蓿地、荒草地),土壤 SOC 含量具体表现为文冠果林地(2.456 g/kg) > 云杉林地(2.178 g/kg) > 荒草地(2.164 g/kg) > 苜蓿地(1.670 g/kg) > 沙棘灌木地(1.481 g/kg);土壤 TN、TP 含量表现为文冠果林地(0.123,0.044 g/kg) > 云杉林地(0.119,0.035 g/kg) >

表 1 样地土壤基本物理性质

植被类型	pH (1 : 2.5)	容重/ (g · cm ⁻³)	最大持水量/ (g · kg ⁻¹)	总孔隙度/%
荒草地	7.90±0.01	1.10±0.04	623.21±28.02	67.62±1.09
苜蓿地	7.81±0.02	1.11±0.02	568.49±18.18	63.05±1.16
沙棘灌木地	7.70±0.01	1.12±0.02	580.32±24.90	64.39±1.57
文冠果林地	7.43±0.07	1.13±0.04	578.08±37.26	64.32±1.82
云杉林地	7.60±0.02	1.22±0.03	505.21±29.03	61.18±1.98

注:表中数据为平均值±标准差。

1.4 数据处理

使用 SPSS 24.0 软件处理数据,采用单因素方差分析(One-way AVONA)检验不同植被类型及生长季条件下土壤养分(SOC、TN、TP)及化学计量比间的差异,并用 LSD 法进行多重比较;通过双因素方差分析(Two-way AVONA),验证植被类型及生长季因素及交互作用下对土壤养分(SOC、TN、TP)及化学计量比的影响;通过 Pearson 相关性分析土壤养分(SOC、TN、TP)及化学计量比间相关关系;使用 Excel 2010 绘图。文中使用 0—60 cm 土层的数据进行分析,各指标数值为各植被类型下各土层(0—10, 10—20,20—40,40—60 cm)的加权平均,权重为土层厚度所占比例。

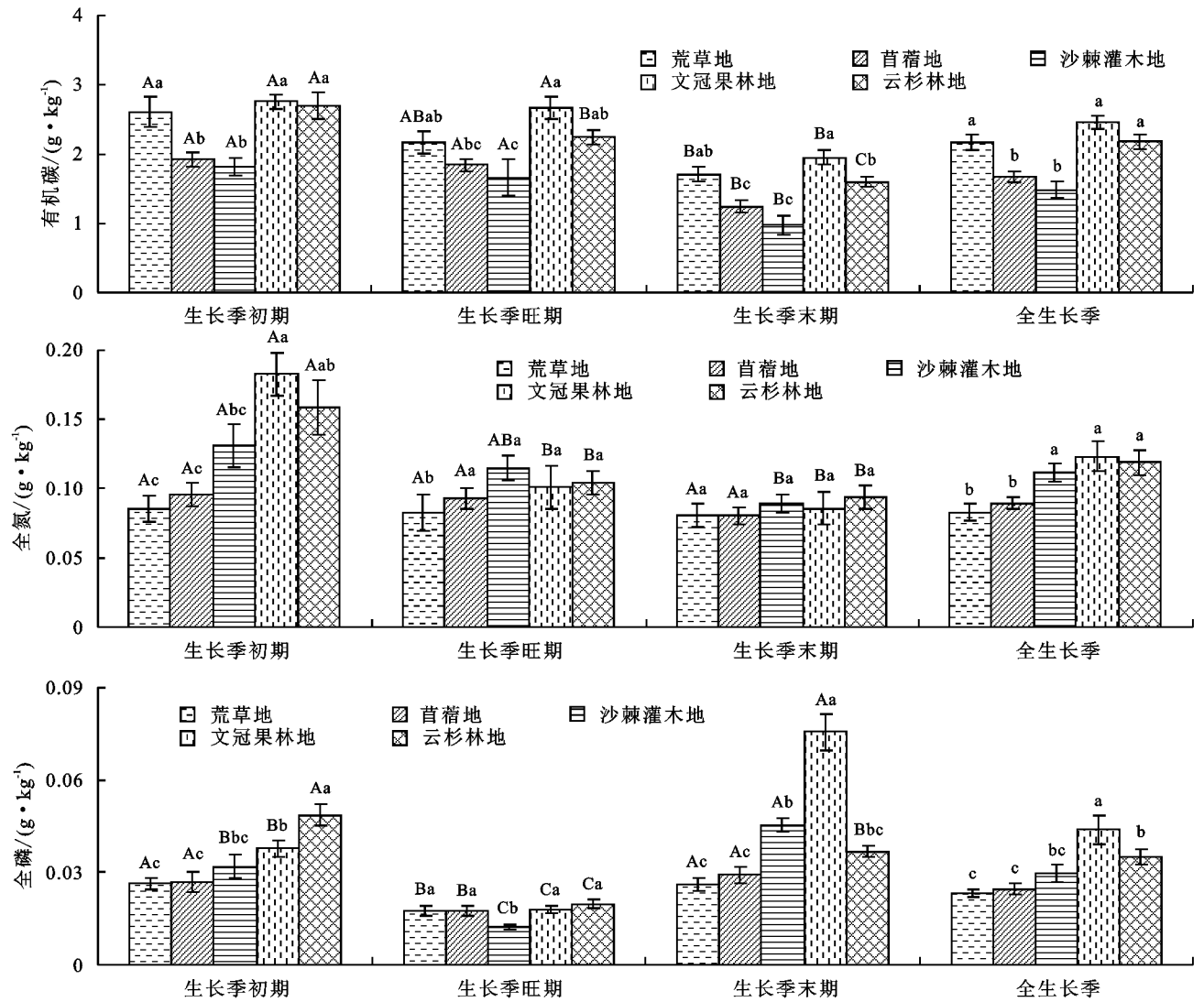
2 结果与分析

2.1 不同植被类型和生长季阶段的土壤 SOC、TN、TP 含量的变化

不同植被类型和生长季阶段的土壤 SOC、TN、TP 含量的双因素方差分析(表 2)显示,土壤 SOC、TN、TP 在植被类型及生长季单一因素作用下均存在显著性差异($P<0.001$),且 TN($P<0.01$)、TP ($P<0.001$)在植被类型和生长季的双因素交互作用下表现出不同水平的显著差异。

沙棘灌木地(0.112,0.030 g/kg) > 苜蓿地(0.090, 0.025 g/kg) > 荒草地(0.083,0.023 g/kg)。随着生长季的推移,5 种植被类型下的土壤 SOC、TN 含量均呈现逐渐降低的趋势,而土壤 TP 含量则表现出“V”字形趋势,即在生长季旺期出现最低值(图 1)。具体表现为:在生长季初期,5 种植被类型土壤 SOC 含量显著高出生长季末期 34.5%~46.2%;草地(荒草地、苜蓿地)土壤 TN 含量在生长季阶段间无显著差异,乔灌林地(沙棘灌木

地、云杉林地、文冠果林地)生长季初期土壤 TN 含量显著高出生长季末期 32.1%~53.0%;在生长季旺期,5 种植被类型土壤 TP 含量显著低于生长季初期及生长季末期 3.8%~72.6%。



注:小写字母表示同一生长季不同植被类型间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一植被类型不同生长季间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同植被类型各生长季下 0—60 cm 土壤养分含量

2.2 不同植被类型和生长季阶段的土壤养分化学计量特征

从表 2 可以看出,因土壤 SOC、TN、TP 含量受主导因素的不同,C : N、C : P、N : P 在受植被类型及生长季单一因素作用下表现出不同水平的显著差异,且在植被类型和生长季的双因素交互作用下 C : P($P<0.01$)、N : P($P<0.001$)均表现出显著差异,而 C : N 无显著差异。

由表 3 可知,全生长季下,荒草地土壤 C : N 显著高于其他 4 种植被 47.0%~71.4%,且其土壤 C : P、N : P 与沙棘灌木地差异显著;而乔木(文冠果林地、云杉林地)林地间土壤化学计量比(C : N、C : P、N : P)及草地(荒草地、苜蓿地)间土壤 C : P、N : P 间均无显著性差异。随着生长季的推移,5 种植被类型下的土壤 C : N、C : P、N : P 均呈现先升后降的趋势,即各生长季阶段,C : N、C : P、N : P 均值具体表

现为生长季旺期(31.554,120.160,6.371)>生长季初期(22.162,76.515,3.959)>生长季末期(20.488,40.838,2.450),5 种植被类型下 C : N 在生长季阶段间整体无显著性差异,C : P、N : P(除荒草地外)整体表现为生长季旺期显著高出生长季初期及生长季末期。

2.3 不同植被类型下土壤养分间及其与化学计量比的相关关系

从表 4 可以看出,研究区不同植被类型各生长季阶段下土壤 SOC、TN、TP 间均存在极显著正相关关系($P<0.01$)。从图 2 可以看出,土壤 SOC、TN、TP 与对应化学计量比值间存在一定相关关系,但显著水平不同。其中,SOC 与 C : N、C : P 关系均不显著($P=0.182,P=0.132$),而 TN 与 C : N、N : P 及 TP 与 C : P 间呈现出极显著线性相关关系($P<0.001$),说明该研究区土壤 N、P 元素对其化学计量比值影响较大。

表 3 不同植被类型各生长季下 0—60 cm 土壤 C、N、P 化学计量特征

指标	生长季	荒草地	苜蓿地	沙棘灌木地	文冠果林地	云杉林地
C : N	初期	36.508±6.083Aa	21.371±1.700Ab	17.385±3.662Ab	16.073±1.174Ab	19.472±2.169Ab
	旺期	66.284±24.839Aa	20.839±1.224Ab	14.682±2.510Ab	31.923±4.259Ab	24.044±3.193Ab
	末期	25.334±4.164Aab	15.976±1.337Bbc	10.648±1.121Ac	31.939±8.101Aa	18.544±1.955Abc
	全生长季	49.708±8.880a	19.395±0.903b	14.238±1.554b	26.645±3.243b	20.686±1.458b
C : P	初期	98.826±4.022Ba	84.584±11.714Bab	63.932±7.646Bbc	75.693±4.700Bbc	59.542±6.079Bc
	旺期	121.205±7.354Aab	112.584±8.422Aab	105.593±17.147Ab	140.443±7.808Aa	120.975±8.990Aab
	末期	68.131±3.997Ca	43.623±2.008Cb	21.057±2.633Cc	27.023±1.969Cc	44.356±2.736Bb
	全生长季	95.335±4.726a	80.264±6.719ab	59.703±7.959b	77.559±8.399ab	74.958±6.669ab
N : P	初期	3.357±0.375Ab	3.962±0.471Bab	4.248±0.408Bab	4.969±0.433Aa	3.257±0.255Bb
	旺期	4.734±0.810Ab	5.460±0.348Ab	9.848±0.685Aa	6.123±1.074Ab	5.690±0.603Ab
	末期	3.442±0.458Aa	2.972±0.303Bab	2.018±0.169Cbc	1.230±0.191Bc	2.586±0.234Bab
	全生长季	3.844±0.342b	4.131±0.275ab	5.372±0.616a	4.107±0.519ab	3.844±0.319b

表 4 不同植被类型各生长季阶段土壤 SOC、TN、TP 间的相关分析

指标	生长季初期		生长季旺期		生长季末期	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP
SOC _{GS}	0.688 **	0.615 **	0.786 **	0.694 **	0.733 **	0.506 **
TN _{GS}	1.000	0.777 **	1.000	0.673 **	1.000	0.359 **

注：* 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关；** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关；表中 SOC_{GS}、TN_{GS} 分别为不同植被类型各生长季阶段对应的土壤 SOC、TN 元素。

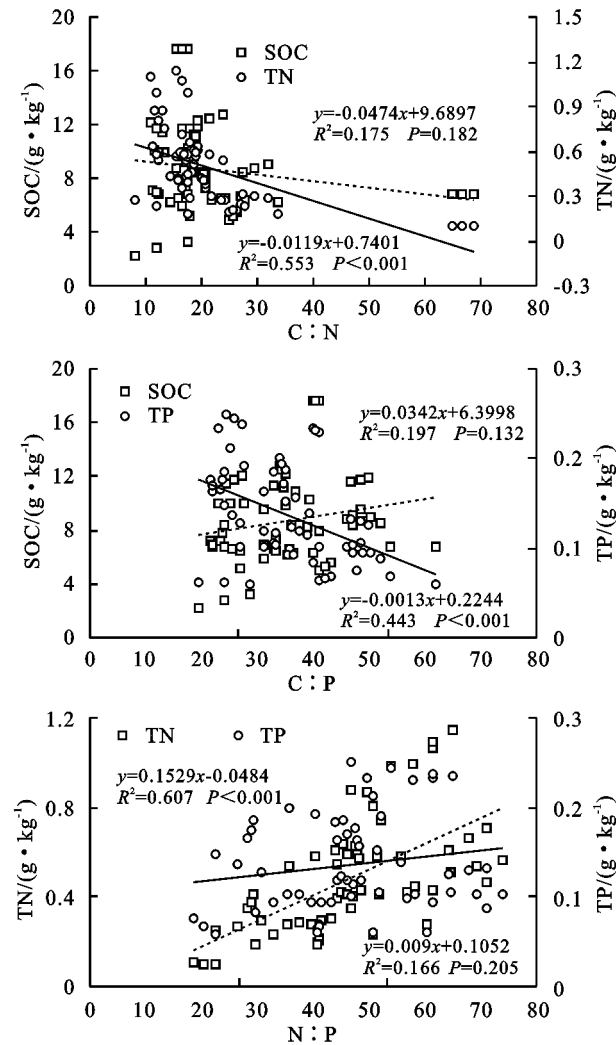


图 2 土壤 C、N、P 含量与对应化学计量比之间的关系

3 讨论

3.1 不同植被类型和生长季阶段的土壤 SOC、TN 和 TP 含量差异

C、N、P 元素作为构成土壤养分的基础组成部分^[4],其含量的高低可用以表征区域土壤质量的状况。本研究得出,植被类型可以显著影响到土壤 C、N、P 养分含量(表 2)。在全生长季中,乔木林地土壤 C、N、P 养分高于灌草地(图 1),这与前人^[15]的研究结果表现一致。一方面植被主要通过表层动植物残体、植物根系分泌、土壤矿化^[15]及土壤微生物的贡献为土壤输送 C、N、P 元素^[4];另一方面,不同的地表植被,对土壤碳氮元素累积速率的影响有着明显差异^[15],而乔木植被生长茂盛,物种丰富度较大,伴生有大量草本植物^[21],使得乔木林地土壤表层提供大量的枯枝落叶和动物、微生物残体等^[8],可有效加快植被凋落物分解速率^[4],促进养分的归还速率,同时碳、氮元素间均存在极显著的正相关关系(表 4),使得土壤各养分含量均明显增加,进而导致乔木林地土壤 C、N 含量高于灌草地。土壤 P 元素对植被类型的响应机制与 SOC、TN 不同^[3],但又与碳氮元素间存在极显著正相关关系(表 4),其含量受到立地地质特征的影响^[22],主要来源于岩石风化释放及土壤表层动植物残体的元素归还^[15]。黄土丘陵区流水侵蚀严重,土壤中 P 元素易受地表径流冲刷及降水淋溶作用影响使其从土壤流失^[3],而乔木林地林冠面积大,可有效减少降水击溅带来的侵蚀作

用,且其伴生的草本植物也可减缓地表径流冲刷^[21],为土壤提供有效的保护,进而使得乔木林土壤 TP 含量高于灌草地。

在本研究区,不同植被类型下土壤养分(SOC、TN、TP)含量在生长季阶段间存在较为明显的差异,土壤 SOC、TN 含量随着生长季的产生不同程度的消耗,但在由生长季旺期向末期推移过程中,土壤 TP 含量有一定的储集(图 1),这与周沁^[8]、赵满兴等^[23]对南岭山及黄土高原土壤养分的季节动态研究结果相似。有学者^[8]认为,植被生长季阶段间土壤养分变化规律不仅与地上植被生长发育规律息息相关,也因不同植被对外界水热条件的敏感度不同,而受到不同季节下水热条件的影响。不同植被类型下土壤 C、N、P 含量在生长季初期向生长季旺期推移过程中均产生一定的消耗(图 1),这是因为植被由生长季初期(4 月)向旺期(7 月)推移过程中,植被进入生长最活跃时期,地上植被对土壤养分的摄取量达到峰值^[8],此时土壤微生物量碳氮也达到最大值^[24],但该区域植被在生长季旺期具有较高的土壤 C:N 值(14.682~66.284),表明区域有机质分解速率较慢^[15],导致此时土壤养分的输出量大于输入量。土壤 C、N 含量在由生长季旺期(7 月)向末期(10 月)推移时规律与之前表现一致,但土壤 P 元素含量却与之相反,这是因为植被在向末期推移中,对土壤养分的摄取量逐渐减少^[8],同时土壤温度的降低使得土壤微生物量及活性减弱^[25],且植被在生长季末期具有较高的土壤 C:N (14.238~49.708)(表 3),进而导致微生物对土壤有机质的分解效应仍小于植被对土壤养分的吸收效应;但土壤 P 元素的来源与保持机制与土壤 C、N 元素存在差异^[22],而黄土丘陵区 7—9 月降水集中,此时低温及充足的水分有利于抑制植被对土壤 P 元素的吸收及促进土壤中 P 元素的扩散^[26],同时植被根系逐渐衰老,极大地降低植被对土壤 P 素的吸收量^[26],此时土壤微生物对动植物残体的分解归还 P 元素输入量大于输出量,土壤 P 元素得以储集。

3.2 不同植被类型和生长季阶段的土壤 C:N:P 化学计量特征差异

植被类型及生长季会导致土壤养分化学计量比特征存在一定差异,而养分化学计量比是用作表征 C、N、P 矿化和固持作用及土壤内部元素循环的重要指标之一^[17]。土壤 C:N 值是衡量土壤 C、N 养分平衡关系的重要指标^[3],反映出土壤微生物对有机质的分解速率,较高的 C:N 表明区域土壤有机质分解速率及土壤矿化速率较慢^[15]。本研究中,在全生长季下各植被

类型 0—60 cm 土壤 C:N 值(14.238~49.708)均较全国平均值(12.3)^[27]偏大,表明该区域不同植被类型下土壤有机质分解速率及矿化速率缓慢,有利于土壤中有机的累积,这与前人^[15]的研究结果相似。本研究中,土壤 TN 与 C:N 值表现出极显著负相关关系(图 2),且黄土丘陵区土壤 N 素较匮乏^[28],进而导致区域土壤 C:N 值较高。同时,本研究中,C:N 值在各植被类型生长季阶段间(表 3)及植被类型、生长季双因素交互作用(表 2)下整体无显著性差异,说明土壤 C、N 元素间存在相对稳态,在元素储存及消耗过程中其比值表现较为稳定^[3],且黄土丘陵区土壤 C:N 值在时间上较稳定,进一步表明 C、N 元素间在对同一环境因子的同步响应方面有着较好的耦合关系^[28],印证了生态化学计量学的动态平衡理论。

土壤 C:P 值可用以衡量土壤微生物对有机质 P 元素的释放及从外界吸收转化 P 素矿化潜力,反映出土壤 P 元素矿化能力及其有效性^[15]。研究区各植被类型在全生长季下 0—60 cm 土壤 C:P 均值为 77.564,远高于全国平均值(61.0)^[27],较高的 C:P 值说明研究区土壤 P 元素有效性较低,P 素矿化速率较慢,同时微生物分解过程中易受到 P 元素的限制^[15]。这可能是因为研究区各植被类型在其生长过程中,土壤微生物时刻分解土壤有机质,土壤中 C 素在消耗的同时也进行一定的补充^[24],但土壤 P 素对植被类型的响应机制与 C 素存在差异^[22],在植被生长过程中,P 素消耗但微生物分解释放的 P 素含量相比于 C、N 元素释放量较低,且本研究区土壤 C:P 与 TP 表现出极显著负相关关系(图 2),因而该区域各植被类型在全生长季下土壤 C:P 值偏高。同时,各植被类型土壤 C:P 值在生长季阶段间表现为旺期>初期>末期(表 3),且在末期时 C:P 值低于全国平均值(61.0)^[27],说明各植被类型在生长季初期、旺期阶段土壤 P 素矿化速率缓慢,而在末期时,植被土壤不再受土壤 P 素限制,P 素有效性提高。有研究^[8]表明,植被快速生长发育阶段对 P 素需求量较大,极易造成 P 素过度消耗^[29],而生长末期时,植被 P 素需求量降低,P 素有效累积,因此生长末期 C:P 值较低。

土壤 N:P 值可用以预测土壤养分限制状况,也是判断土壤 N 饱和状况的重要指标^[15]。研究区各植被类型在全生长季下 0—60 cm 土壤 N:P 均值(4.260)略低于全国平均值(5.2)^[27]。有研究^[17]发现,当研究区域土壤 N:P<10 时,表明区域植被生长受到较严重的土壤 N 素限制,且本研究中,土壤 TN 与 N:P 表现为极显著正相关关系(图 2),较低的

N:P 值进一步说明黄土丘陵区各植被类型下土壤 N 素的匮乏,印证了朱秋莲^[28]对黄土丘陵区土壤的研究结果。同时,各植被类型土壤 N:P 值在生长季旺期略高于全国平均值^[27](表 3),说明植被生长季旺期阶段,土壤主要受到 P 素限制,此时区域内土壤 P 元素较缺乏,这主要是因为植被在快速生长发育阶段对土壤 P 元素需求量更大造成的^[29]。本研究中,全生长季下,荒草地土壤 C:N 显著高于其他 4 种植被 47.0%~71.4%,且其土壤 C:P、N:P 值与沙棘灌木地差异显著,说明乔灌植被有助于土壤 N 素的存留,这是因为乔灌植被土壤微生物量较高,枯枝落叶较多,且沙棘灌木作为典型的固氮树种,更有助于土壤氮素的固存,这与前人^[30]的研究结果相似。同时本研究中,C:N 与 TN、C:P 与 TP 间均表现出极显著负相关关系(图 2),表明土壤 N、P 元素主要影响黄土丘陵区土壤养分化学计量特征及其过程。此外,土壤 C:N:P 化学计量比结果表明该研究区植被生长过程中受土壤 N、P 元素的限制程度具体表现为 N>P。

4 结 论

黄土丘陵区不同植被类型下土壤有机质分解速率较慢,P 素有效性较低,且该区植被生长过程中受土壤 N、P 元素限制程度表现为 N>P。植被类型及生长季阶段对土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征均会产生一定的影响:乔木林地较灌草地在土壤养分存留方面占有一定优势,且各植被下土壤 C、N 元素均随植被生长发育产生损耗,土壤 P 元素在生长季末期阶段有着一定的储集,且乔灌植被土壤 C:N 显著低于荒草地;N、P 元素主要影响该区土壤养分化学计量特征及其过程,且土壤在时间上具有较为稳定的 C:N,同时各化学比值均表现为生长季旺期高于生长季初期及末期。因此,该研究区在实际植被恢复过程中,应根据不同植被各生长季阶段下土壤养分状况,合理施加氮磷肥,进一步减少土壤养分流失,加速植被修复,实现区域土壤生态恢复的目的。

参考文献:

[1] Sardans J, Janssens I A, Ciais P, et al. Recent advances and future research in ecological stoichiometry[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 2021, 17: e125611.

[2] Du C J, Gao Y H. Grazing exclusion alters ecological stoichiometry of plant and soil in degraded alpine grassland [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, 308: e107256.

[3] 刘帅楠,李广,吴江琪,等.黄土丘陵区不同土地类型下土壤养分特征:基于生态化学计量学[J]. *草业学报*,

2021, 30(3): 200-207.

[4] 贾培龙,安韶山,李程程,等.黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 315-321.

[5] 欧延升.甘肃陇南山地不同植被恢复模式下土壤酶活性特征及其影响因素研究[D].兰州:兰州大学,2019.

[6] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5594-5602.

[7] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 133-138.

[8] 周沁.闽楠杉木及其混交人工林土壤和凋落物养分季节动态变化特征[D].长沙:中南林业科技大学,2020.

[9] 濮阳雪华,王月玲,赵志杰,等.陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究[J]. *草业学报*, 2021, 30(5): 13-24.

[10] 李少华,王学全,包岩峰,等.不同类型植被对高寒沙区土壤改良效果的差异分析[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 60-64.

[11] 罗梦娇,艾宁,刘长海,等.半干旱黄土区不同植被类型对土壤水分的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(2): 177-184, 191.

[12] Loch R J. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland[J]. *Soil Research*, 2000, 38(2): 299-213.

[13] 刘新春,赵勇钢,刘小芳,等.晋西黄土区典型人工植被生长季深层土壤储水量与细根生物量分布特征[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 95-101.

[14] Zhu J B, Zhang F W, Li H Q, et al. Seasonal and inter-annual variations in CO₂ fluxes over 10 years in an alpine shrubland on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 228/229: 95-103.

[15] 何高迅,王越,彭淑娴,等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4425-4435.

[16] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1308-1320.

[17] 温晨,杨智姣,杨磊,等.半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1824-1834.

[18] 高德新,张伟,任成杰,等.黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3622-3630.

[19] 王治国,张超,孙保平,等.全国水土保持区划概述[J]. *中国水土保持*, 2015(12): 12-17.

- from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547:184-195.
- [17] Duan K, Mei Y D. Comparison of meteorological, hydrological and agricultural drought responses to climate change and uncertainty assessment[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(14):5039-5054.
- [18] 张克新, 王娟娟, 彭娇婷, 等. 贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(2):10-18.
- [19] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. California, USA: American Meteorological Society, 1993.
- [20] Sergio M V, Juan I L, Santiago B, et al. Accurate computation of a streamflow drought index[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(2):318-332.
- [21] Anurag M, Anil K, Rajesh P S. Application of heuristic approaches for prediction of hydrological drought using multi-scalar streamflow drought index[J]. 2019, 33(11):3985-4006.
- [22] 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级(GB/T 20481—2006)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [23] 周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(10):1694-1706.
- [24] Zarei A R, Shabani A, Mahmoudi M R. Susceptibility assessment of winter wheat, barley and rapeseed to drought using generalized estimating equations and cross-correlation function[J]. *Environmental Processes*, 2021, 8(1):163-197.
- [25] Yevjevich V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 7(3):353.
- [26] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10):206-214.
- [27] 许怡然, 鲁帆, 谢子波, 等. 潮白河流域气象水文干旱特征及其响应关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(2):220-228.
- [28] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 等. 喀斯特地区水土漏失监测方法评述[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(3):30-38.
- [29] 苏俊磊, 罗为群, 谷佳慧, 等. 岩溶峰丛洼地水土漏失过程、机理及综合防治研究进展[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(2):16-22.
- (上接第 349 页)
- [20] 孙倩倩. 黄土高原植被生长对气候响应的延迟规律与时间多尺度特征分析[D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [21] 曹流芳. 滨海湿地围垦区灌草群落对土壤养分特性改良测评[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [22] Zhang Y L, Li Y, Wang S Z, et al. Soil phosphorus fractionation and its association with soil phosphate-solubilizing bacteria in a chronosequence of vegetation restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 164:e106208.
- [23] 赵满兴, 余光美, 白二磊, 等. 陕北黄土高原植被恢复对土壤理化性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(25):86-94.
- [24] 何容, 王国兵, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(3):394-399.
- [25] 涂志华, 尉永键, 范志平, 等. 太子河源流域不同类型水源涵养林土壤微生物生物量碳、氮的季节动态[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7):2139-2147.
- [26] 刘瑞龙, 杨万勤, 谭波, 等. 土壤动物对川西亚高山和高山森林凋落叶第一年不同分解时期 N 和 P 元素动态的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(12):1080-1090.
- [27] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3):139-151.
- [28] 朱秋莲. 黄土丘陵区不同植被带立地条件对植物—枯落物—土壤生态化学计量特征的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [29] 张芸, 李惠通, 张辉, 等. 不同林龄杉木人工林土壤 C : N : P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(7):2520-2531.
- [30] 闫丽娟, 王海燕, 李广, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):190-196, 204.