

不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量特征

魏亚娟¹, 党晓宏^{1,2}, 汪 季^{1,2}, 张凯辉³, 高 岩¹, 李淑卓¹

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古杭锦荒漠生态定位观测研究站,
内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3.内蒙古赤峰市克什克腾旗水利局,克什克腾旗 内蒙古 025350)

摘要: 为了阐明灌丛沙堆发育对土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量特征的影响,以吉兰泰荒漠区不同演化阶段白刺(*Nitraria tangutorun*)灌丛沙堆为研究对象,研究 0—100 cm 土层土壤 C : N : P 化学计量特征在不同演化阶段的变化规律和垂直分布规律。结果表明:(1)白刺灌丛沙堆土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)随演化阶段(雏形阶段→发育阶段→稳定阶段→衰亡阶段)的变化呈先增后减的变化趋势。演化阶段对白刺灌丛沙堆 SOC 影响显著($P<0.05$),对 TN、TP 无显著影响($P>0.05$),其 SOC、TN、TP 均值含量在 0—100 cm 土层分别为 0.42~0.58,0.04~0.07,0.22~0.25 g/kg,远小于全国土壤平均水平(11.12,1.06,0.65 g/kg)。(2)白刺灌丛沙堆 SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量比随土层深度增加无明显规律性。(3)土壤 SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量比均属于中等变异,且变异系数随白刺灌丛沙堆演化不断减小。(4)土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度对白刺灌丛沙堆土壤 TN、C : N、N : P 影响显著,而土壤含水量、pH 对白刺灌丛沙堆 SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量比无显著影响。各演化阶段白刺灌丛沙堆 SOC、TN 是调控白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量比的主要因素。因此,该研究结果明晰了白刺灌丛沙堆土壤 C : N : P 生态化学计量特征对不同演化阶段的响应,为该区域白刺群落的保护、利用和植被恢复与重建提供科学依据。

关键词: 土壤养分;生态化学计量;白刺灌丛沙堆;演化阶段;荒漠区

中图分类号:S718.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)02-0377-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.050

Characterization of the Soil Ecological Stoichiometry of *Nitraria tangutorun* Nebkhas During Different Succession Stages

WEI Yajuan¹, DANG Xiaohong^{1,2}, WANG Ji^{1,2}, ZHANG Kaihui³, GAO Yan¹, LI Shuzhuo¹

(1.Institute of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018; 2.Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Erdos, Inner Mongolia 017400; 3.Hydrolic Bureau in Keshiketeng County of Chifeng, Keshiketeng, Inner Mongolna 025350)

Abstract: To investigate the effect of development stage on soil C : N : P stoichiometry characteristics of *Nitraria tangutorun* nebkhas. Taking *Nitraria tangutorun* nebkhas at different development stages (for rudimental stage, developing stage, stabilizing stage and degrading stage) in desert area of Jilantai as research object, and measure vertical distribution of soil C : N : P stoichiometry from 0 cm to 100 cm in depth under *Nitraria tangutorun* nebkhas. The results showed that: (1) Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) showed first increased and then decreased with the succession of *N. tangutorum* nebkhas (rudimental stage→developingstage→stabilizingstage→degrading stage). The effect of succession stage on SOC was significant ($P<0.05$), but not on TN and TP ($P>0.05$). The contents of SOC, TN and TP in the four stages of evolution were 0.42~0.58 g/kg, 0.04~0.07 g/kg and 0.22~0.25 g/kg in 0—100 cm soil depth, respectively, and the contents was far less than national average levels (11.12, 1.06, 0.65 g/kg). (2) There was no obvious change rule for the contents of SOC, TN, TP and soil C : N : P stoichiometry in the four succession stages of *Nitraria tangutorun* nebkhas decreased with the increase of

收稿日期:2020-10-20
资助项目:国家自然科学基金项目“荒漠灌丛空间构型对其‘肥岛’发育的作用机制”(41967009);国家重点研发计划专项“内蒙古干旱荒漠区沙化土地治理与沙产业技术研发与示范”“绿洲盐碱湖区沙害防治关键技术研究与示范”(2016YFC0501003)
第一作者:魏亚娟(1994—),女,在读博士,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:weiyajuan0305@163.com
通信作者:党晓宏(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:dangxiaohong1986@163.com

soil depth. (3) The content and stoichiometry of SOC, TN and TP belonged medium variability, and which decreased with the increase of soil depth. (4) Soil bulk density, soil capillary porosity and non-capillary porosity had significant effect on TN, C : N, N : P, and soil water content and pH had no significant effect on the contents of SOC, TN, TP and soil C : N : P stoichiometry. Confirm the importance of SOC and TN in regulating the soil C : N : P stoichiometry of *Nitraria tangutorum* nebkhas. Therefore, the present results clarify the response of C : N : P stoichiometry of *Nitraria tangutorum* to different succession stages. It provides scientific basis for the protection, utilization and vegetation restoration and reconstruction of *Nitraria tangutorum* community in this area.

Keywords: soil nutrient; ecological stoichiometry; *Nitraria tangutorum* nebkhas; evolvement stage; desertification areas

生态化学计量比主要指碳(C)、氮(N)、磷(P)元素平衡及其耦合关系的特征,其定量变化反映植物的生态适应策略^[1]。土壤作为陆地生态系统的重要组成,其C、N、P不仅是植物生长发育的营养来源^[2],也是植物赖以生存的物质基础^[3],影响植物群落的组成、发育与稳定^[4]。以往对生态化学计量特征的研究主要以森林、草地和湿地等陆地生态系统为主,近年来荒漠生态系统也逐渐受到学者们的重视。学者们从不同尺度研究了各植物类型下叶片、土壤生态化学计量特征,探讨生态化学计量的空间分布特征及其影响机制^[5-7]。但是,这些研究只是针对某一时期内生态化学计量特征进行研究。随着植被生长阶段^[8]、恢复阶段^[9]和演替阶段^[10]的不同,土壤C、N、P生态化学计量比存在明显的动态变化。迄今,基于时间尺度探讨荒漠土壤C、N、P生态化学计量的信息十分缺乏。

白刺作为荒漠生态系统一种常见的植物类型,在西北荒漠区分布广泛。目前,关于白刺灌丛沙堆生态化学计量的研究也取得一定进展。如Wang等^[11]和牛得草等^[12]对白刺灌丛沙堆根系和叶片研究表明,白刺叶片C、N、P含量及其生态化学计量比季节性变化差异显著,春季容易受到N元素限制,夏季容易受到P元素限制;邢磊等^[13]研究认为,白刺灌丛沙堆枝、叶、根生长过程中的元素分配容易受到生物量大小的影响,且白刺生长容易受到P元素限制;龚雪伟等^[14]对艾比湖流域白刺叶片和土壤研究同样证明白刺冠下土壤P元素是影响其C、N、P化学计量的主要因素;刘学东等^[15]对白刺灌丛沙堆0—100 cm土壤研究表明,土层深度对SOC和TN影响显著,对TP影响不显著。综上可知,目前对白刺灌丛沙堆生态化学计量的研究主要是针对白刺叶片,而对土壤的研究相对较少。由于植被生长与土壤存在相互作用的关系,随着白刺灌丛沙堆的演化,其土壤理化性质会发生一系列变化。因此,白刺灌丛沙堆的演化过程是生态过程与环境因子共同作用的结果。

基于此,本文以吉兰泰荒漠区白刺灌丛沙堆为研究对象,通过野外调查和室内分析,对灌丛沙堆土壤理化性质、土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)生态化学计量特征及其相关关系进行研究,以阐明不同演化阶段和土层深度对白刺灌丛沙堆的土壤理化因子和C、N、P循环过程的影响,为进一步研究荒漠区土壤C、N、P生物地球化学循环及评估陆地生态系统的元素收支提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠西南缘(105°47′08″—105°47′38″E,39°46′58″—39°47′40″N),该区域属于典型温带大陆性季风气候,海拔960~979 m,降水量为100~140 mm,年均潜在蒸发量为3 006 mm。极端最高气温40.4℃,极端最低气温-31.2℃,年均气温8.6℃。年日照时间3 316 h,无霜期160 d。年均风速3.5 m/s,主风向为西北风。试验点主要布设在固定沙地,该区域地势平坦,无人为活动干扰。土壤类型为风沙土,地表土壤疏松,土壤发育程度较低,土壤养分贫瘠。自然植被主要以白刺为主,白刺灌丛沙堆密度为48个/hm²,其他伴生种有白沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 植被调查 植被调查选择在2019年8月中旬植物生长季内进行,采用样方法,在远离公路(防止人为干扰和边缘效应的影响)的固定沙区随机选择10个100 m×100 m的样方(样方间距<1 km)。每个样方中分别选择4种不同演化阶段的灌丛沙堆作为研究对象,同时选择3个大小、高度和演化阶段基本一致的灌丛沙堆作为重复,共计120个样本。

灌丛沙堆的演化阶段具体划分标准由参考文献^[16]和样地实际情况共同决定。根据划分标准分别测

定每种演化阶段灌丛沙堆的长轴、短轴、高度,并在迎风坡和背风坡各设立 2~3 个 1 m×1 m 草本样方,调查样方内草本植物种类、株数、高度。具体情况见表 1。

1.2.2 土壤样品采集与指标测定 在样方内对每种演化阶段灌丛沙堆由顶部进行分层(0—5,5—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm)取样。每层用环刀取 2 份土,一份原状土用于土壤含水量、土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的测定^[17];另

表 1 不同演化阶段灌丛沙堆基本概况

演化阶段	沙堆长轴/m	沙堆短轴/m	沙堆高度/m	植被高/cm	植被盖度/%	物种类型	物种数量/种	形态	植被生长状况	结皮状况
雏形阶段	3.95±0.47	3.22±0.37	0.59±0.22	33.33±8.25	34.00±14.32	白刺、沙米	2.00	形态不规则	植株生长状况良好,无枯死率	迎风坡无结皮,背风坡有零星结皮
发育阶段	5.03±0.32	4.02±0.55	0.81±0.18	72.00±12.30	42.67±8.11	白刺、白沙蒿、沙米	3.00	半椭圆形	植株以多株生长,且生长状态良好,无枯死率	迎风坡和背风坡均有大面积物理结皮
稳定阶段	5.08±0.89	4.51±0.64	0.92±0.12	61.33±11.45	60.33±10.29	白刺、白沙蒿、披碱草、沙米	3.00	半椭圆形	植株生长状态良好,枯死率较低	迎风坡以流沙物主,背风坡有大部分结皮
衰亡阶段	6.17±1.21	4.48±0.52	1.32±0.33	43.00±5.42	45.67±5.58	白刺、白沙蒿、沙米	4.00	近半椭圆形	植株以单株生长,生长状况不佳,枯死率占半数以上	迎风坡、背风坡及其两侧均以流沙为主,且坡面凹凸不平

注:表中数据均为平均值±标准差。

表 2 不同演化阶段白刺灌丛沙堆表层土壤机械组成

单位: %

演化阶段	黏粒	粉粒	砂粒
雏形阶段	0.82±0.24c	3.12±0.77b	96.13±0.11a
发育阶段	1.23±0.32c	5.22±1.23a	93.45±0.59a
稳定阶段	3.89±0.47a	5.12±1.82a	91.84±1.25a
衰亡阶段	2.54±0.11b	4.12±1.33b	93.72±1.52a

注:同列不同字母表示不同演化阶段间差异显著($P<0.05$)。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 对试验数据进行前期整理,土壤生态化学计量比均为质量比。采用一般线性模型(GLM)分析演化阶段、土层深度及其交互作用对灌丛土壤理化性质和化学计量比的影响(Two-way ANOVA)。然后,对各土壤养分指标及其生态化学计量比进行单因素方差分析(One-way ANOVA),数据表达形式为平均值±标准差。采用 Pearson 相关分析对灌丛沙堆各指标进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤理化性质的比较

由图 1 可知,白刺灌丛沙堆土壤理化性质在各演化阶段不同土层深度表现出不同的变化趋势。其中,雏形阶段土壤容重高于发育阶段和稳定阶段($P<0.05$),这可能与土壤砂粒含量有关。由于砂粒密度高于粉粒、黏粒,雏形阶段土壤砂粒含量高于发育阶段和稳定阶段,因此导致土壤容重高于两者^[20]。

一份土样与同一样地中其他相同演化阶段和土层深度土样均匀混合后,用于土壤 pH 和养分的测定;土壤 pH 采用 pH 计(STARTER 3100)测定;SOC 采用重铬酸钾外加热法测定;TN 采用凯氏定氮法进行测定;TP 采用高氯酸—硫酸消解钼锑抗比色法测定^[18];表层 0—5 cm 土壤机械组成采用 3000MU 型激光粒度仪进行测定,以美国制^[19]作为土壤粒径分级标准。具体情况见表 2。

土壤含水量、pH 随演化阶段呈先增后减再增的变化趋势。毛管孔隙度随演化阶段的变化呈先增后减的变化趋势,且发育阶段、稳定阶段和衰亡阶段较雏形阶段分别增加 35.49%,33.02%和 32.70%($P<0.05$);非毛管孔隙度随演化阶段呈逐渐降低趋势,且发育阶段、稳定阶段和衰亡阶段较雏形阶段分别减少 55.35%,99.23%和 102.45%($P<0.05$)。

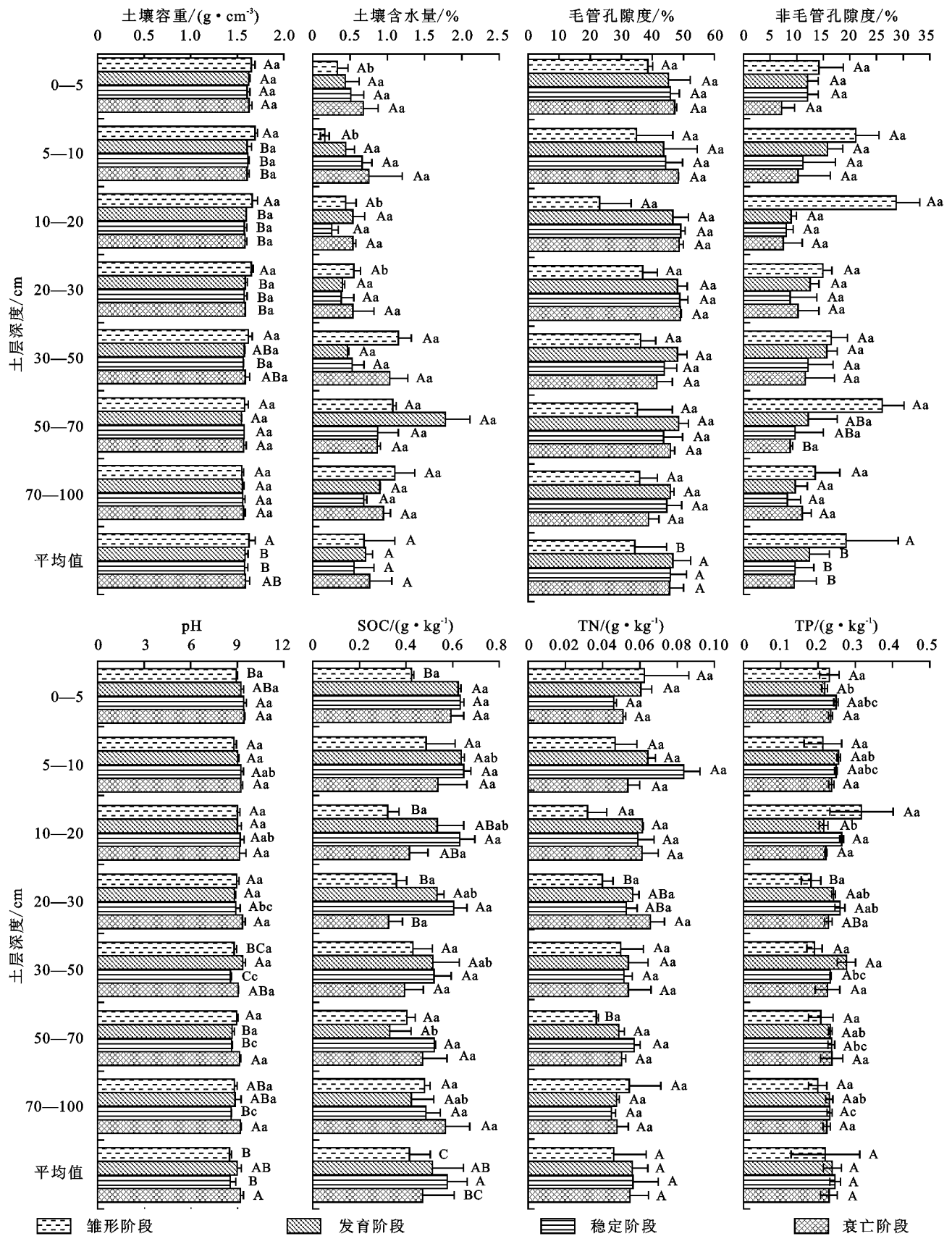
白刺灌丛沙堆 SOC、TN、TP 含量随演化阶段变化均呈先增后减的变化趋势,且在稳定阶段达到最大值。SOC 含量在发育阶段、稳定阶段和衰亡阶段较雏形阶段分别增加 23.78%,39.13%和 13.71%,但各演化阶段 TN、TP 含量差异不显著($P>0.05$)。由表 3 可知,各演化阶段白刺灌丛沙堆土壤 SOC、TN、TP 均属中等变异,且变异系数随演化阶段变化逐渐减小。

2.2 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤 C、N、P 生态化学计量特征

从图 2 可以看出,白刺灌丛沙堆不同土层深度的 C、N、P 生态化学计量比随演化阶段的变化存在较大差异。在 0—100 cm 土层范围内 C:N 范围为 4.95~13.80。在 0—5 cm,发育阶段、衰亡阶段较雏形阶段分别增加 33.63%和 48.72%,稳定阶段增加 76.47%;在 20—30 cm,与雏形阶段相比,发育阶段和稳定阶段 C:N 分别增加 19.92%和 21.71%,衰亡阶段减少 91.72%。

白刺灌丛沙堆在 0—100 cm C:P 范围为 1.30~2.87。在 0—5 cm,稳定阶段、衰亡阶段较雏形阶段

分别增加 36.90%, 35.83% ($P>0.05$), 发育阶段增加 53.48% ($P<0.05$); 在 10—20 cm, 发育阶段、稳定阶段和衰亡阶段较雏形阶段分别增加 94.62%, 89.23% 和 86.92% ($P>0.05$); 在 20—30 cm, 发育阶段和稳定阶段较雏形阶段分别增加 26.92% 和 12.02% ($P>0.05$), 衰亡阶段减少 45.45% ($P<0.05$)。



注:不同大写字母表示同一土层不同演化阶段指标差异显著 ($P<0.05$);不同小写字母表示同一演化阶段不同土层指标差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤理化性质

白刺灌丛沙堆 0—100 cm N : P 范围为 0.14~0.31。在 20—30 cm,发育阶段、衰亡阶段较锥形阶段增加 3.55%,31.82%,稳定阶段减少 10.00%。

由表 3 知,各演化阶段白刺灌丛沙堆土壤 C : N、C : P、N : P 均属中等变异,但变异系数随演化阶段变化规律各异。

2.3 白刺灌丛沙堆土壤理化性质和 C : N : P 化学计量比与演化阶段和土层深度的关系

由前述结果可知,白刺灌丛沙堆土壤理化性质和 C : N : P 化学计量比在不同演化阶段和土层深度存在差异,其受演化阶段和土层深度的综合影响。其中,演化阶段对土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、pH 和 SOC 均有显著影响($P<0.05$)。土层深度

对土壤含水量、pH 和 SOC 有显著影响。演化阶段、土层深度对 TN、TP、C : N、C : P 和 N : P 无显著影响($P>0.05$)。对于 pH、TN 和 N : P,演化阶段和土层深度之间存在明显的交互作用(表 4)。

表 3 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤养分及其生态化学计量比变异系数

演化阶段	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
锥形阶段	0.37	0.40	0.44	0.48	0.37	0.34
发育阶段	0.34	0.28	0.12	0.22	0.36	0.26
稳定阶段	0.27	0.19	0.16	0.28	0.26	0.17
衰亡阶段	0.16	0.23	0.12	0.16	0.16	0.15

注:根据 Jobbágy 等^[21]划分标准,将变异系数分为 CV<0.10 为弱变异,0.1≤CV<1.0 为中等变异,CV≥1.0 为强变异。

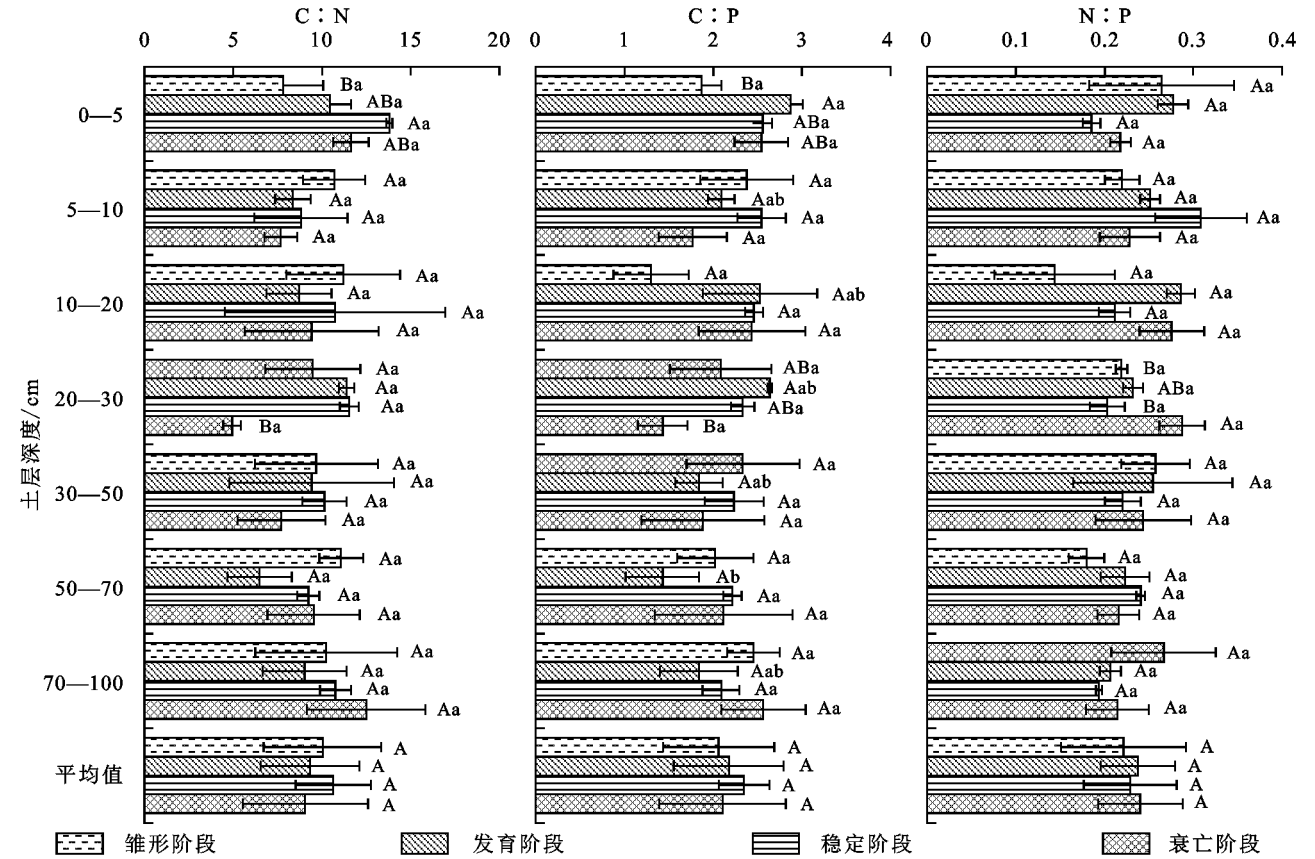


图 2 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤 C : N、C : P、N : P

表 4 演化阶段和土层深度对灌丛沙堆土壤 C : N : P 化学计量比的影响

因素	F 值										
	土壤含水量	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	pH	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
演化阶段	1.025	4.336**	10.110**	9.240**	11.111**	10.309**	4.007	0.950	1.191	1.092	0.709
土层深度	5.253*	2.218	1.606	1.373	6.322**	3.956**	2.068	0.482	0.937	0.996	1.224
演化阶段×土层深度	1.163	1.754	1.408	1.442	3.602**	1.763	2.152*	0.829	1.267	1.802	2.774**

注: * 表示 $P<0.05$ 的显著水平; ** 表示 $P<0.01$ 的显著水平。

3 讨论

本研究显示,吉兰泰荒漠区白刺灌丛沙堆 SOC、TN、TP 含量分别为 0.32~0.65,0.03~0.07,0.18~0.32 g/kg,综合对比黄土高原(7.77,0.76,0.40 g/

kg)^[22]、东北旱作区土壤(16.79,1.43,0.77 g/kg)^[23]、中国北方典型风沙区(12.2,1.2,0.8 g/kg)^[2]、准格尔荒漠区(5.73,0.21,0.35 g/kg)^[7]和乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤(2.45,0.26,0.28 g/

kg)^[24]等地区的土壤养分含量发现,其值远低于全国土壤养分含量平均水平(11.12,1.06,0.65 g/kg)^[25],该结果与玉苏甫·买买提等^[26]的研究结果相同,说明吉兰泰荒漠区白刺灌丛沙堆土壤养分贫瘠。白刺灌丛沙堆土壤 SOC、TN、TP 含量依次为稳定阶段>发育阶段>衰亡阶段>雏形阶段,这可能与白刺灌丛沙堆的植被生长状况和粉黏粒含量有关^[16]。随着植被盖度增加,其防风 and 固沙能力增强^[27]。各演化阶段白刺灌丛植被盖度不同,处于稳定阶段的白刺灌丛盖度和高度较高,有效减弱了风力对土壤粉粒、黏粒和枯落物的吹蚀^[26](表 2),从而增加表层土壤养分含量。另外,处于雏形阶段和发育阶段的白刺灌丛沙堆由于其频繁的沙埋活动,导致其高度、体积增长较快,土壤养分积累较慢。而处于衰亡阶段的白刺灌丛沙堆,由于表层结皮被大面积破坏,加之此阶段白刺灌丛植被盖度和高度下降,导致白刺灌丛稳定性小于其他演化阶段,其抗风能力减弱,土壤养分逐渐流失^[28]。结合以上结果,在今后植被恢复过程中,应优先保护处于稳定阶段的白刺灌丛沙堆,防止 C、N 进一步流失,以维护荒漠绿洲过渡带生态系统稳定。同时也说明,当务之急应加强对吉兰泰荒漠区衰亡阶段白刺灌丛沙堆的保护,例如对处于衰亡阶段的白刺进行人工平茬以促进枝条的再生,防止养分进一步流失而导致荒漠区土壤质量下降。研究中还发现,白刺灌丛沙堆土壤 SOC、TN、TP 含量随着土层深度增加没有明显的规律性。该结果与玉苏甫·买买提等^[26]的研究结果相悖。因为影响土壤养分的因素较多,过程较为复杂,其不仅受土壤成土作用和水热条件的调控,还与地貌类型、植被类型和土壤生物有关,此结果有待于进一步证明。

本研究中白刺灌丛沙堆土壤 C:N、C:P、N:P 平均值分别为 9.07~10.64,1.84~2.56,0.22~0.24,远低于全国土壤平均水平(12.30,52.64 和 4.20)^[22]。(其中,黄土高原为 7.77,17.73,1.70^[23],东北旱作区土壤为 11.45,22.82,2.03^[24],中国北方典型风沙区为 10.1,15.7,1.63(C:N 除外)^[2],准格尔荒漠区为 29.92,15.97,0.50^[7]和乌兰布和沙漠土壤为 9.41,8.70,0.93(C:N 除外))^[25]。通过对 4 种演化阶段白刺灌丛沙堆土壤 C:N、C:P、N:P 对比发现,其比值相对稳定,这可能是因为白刺生长过程中,其土壤和植被之间存在长期稳定的供需关系,最终导致三者之比长期处于稳定状态^[14]。土壤 C:N 可以表征土壤微生物分解有机质的速率,本研究显示,灌丛沙堆不同土层 C:N 差异不显著($P>0.05$),说明土壤

C、N 在积累和分解过程中具有相对固定的比值,因此 C:N 比较稳定。相关性分析结果中 SOC 与 TN 呈极显著正相关关系也证明这一点。灌丛沙堆 C:N 小于全国土壤平均水平,表明灌丛沙堆土壤 C 比 N 更缺乏。朱秋莲等^[29]研究表明,有机质分解速率与土壤 C:N 呈反比。本研究灌丛沙堆土壤 C:N 较低,表明土壤有机质的分解速率大于积累速率^[26],说明吉兰泰气候和土壤环境不利于白刺灌丛沙堆养分积累。因为吉兰泰地区风沙强烈,导致每年枯落物的输入量有限,可输入的有机质较少,土壤 C 含量较低。C:P 是磷有效性的表征参数,其值越低表示土壤磷有效性越高^[26]。前人^[30]研究表明,绝大多数陆地生态系统土壤 C:P 为 10.06~503.5。本研究土壤 C:P 值远小于全国平均水平,表明白刺灌丛沙堆 0—100 cm 土壤 P 有效性较高,表现为 P 的净矿化,说明 P 有效性比较高。另外,Yang 等^[31]也证明,当 $C:P<200$ 时,P 的释放速率大于 P 的固持速率,增加 P 的有效性。该结果需要进一步论证。N:P 是表征土壤氮饱和的诊断指标。本研究 N:P 较低,远小于 1,表明白刺灌丛生长土壤氮的限制作用大于土壤磷。因为白刺灌丛土壤氮主要来源于凋落物的输入和根系分泌物^[15],而土壤 TP 主要来源于土壤母质,属于沉积性元素,导致土壤氮含量较低,而磷含量相对较高,因此 N:P 较低。本研究中还发现,土壤 C、N、P 生态化学计量比随土层深度增加没有明显的规律性。该研究结果与董雪等^[24]对乌兰布和沙漠典型旱生灌木的研究结果不同。因为在灌丛沙堆形成发育过程中,由于气候环境因素影响,导致外源养分输入较少,土层之间养分含量差异较小^[32]。

相关性分析可以揭示土壤物理因子与土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量之间的协调关系,有助于对土壤养分做出更合理的解释^[33]。土壤含水量是土壤元素迁移和循环的重要载体,能直接影响土壤养分含量和植物生长。由表 5 可知,白刺灌丛沙堆土壤 SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量与土壤含水量相关性不显著($P>0.05$),但是该结果不能说明白刺灌丛土壤养分对土壤含水量变化响应不敏感,因为土壤养分及其生态化学计量比内稳性是长期适应环境的结果。土壤容重影响植物根系生长和凋落物分解,进而影响元素在土壤中的运移和积累,土壤容重小则土壤疏松,有利于水分渗透以及元素在土壤中累积^[34]。研究区白刺灌丛沙堆土壤容重与 TN、N:P 呈极显著负相关,与 C:N 呈极显著正相关,这与张芸等^[35]的结果相同,说明土壤容重较大不利于土壤

养分的固存与提升^[36],主要是因为土壤容重较大不利于土壤养分淋溶下渗^[37]。本研究中,各演化阶段白刺灌丛沙堆平均土壤 pH 与 SOC、TN、TP 含量及其生态化学计量比相关性不显著($P>0.05$),说明 pH 变化对土壤养分的影响较为微弱,对土壤碳氮的

固持和积累影响较小^[38]。因为白刺属于盐生植物,对盐渍土壤有较强的适应能力,且盐分的适度增加能促进白刺生长。土壤 SOC、TN 与 C : N、C : P 均呈显著或极显著相关,说明两者均是调控白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量比的主要因素^[39]。

表 5 白刺灌丛沙堆土壤理化性质与生态化学计量之间的关系

组分	土壤含水量	土壤容重	毛管孔隙度	土壤非毛管孔隙度	pH	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
土壤含水量	1.000										
土壤容重	-0.398 * *	1.000									
毛管孔隙度	-0.033	-0.574 * *	1.000								
土壤非毛管孔隙度	-0.118	0.619 * *	-0.843 * *	1.000							
pH	-0.179	-0.183	0.184	-0.150	1.000						
SOC	-0.057	-0.107	0.135	-0.121	-0.258	1.000					
TN	-0.029	-0.343 * *	0.484 * *	-0.467 * *	-0.061	0.576 * *	1.000				
TP	-0.202	0.072	-0.159	0.210	0.082	0.105	0.095	1.000			
C : N	-0.042	0.311 * *	-0.442 * *	0.485 * *	-0.108	0.426 * *	-0.425 * *	0.058	1.000		
C : P	0.063	-0.015	-0.021	0.018	-0.162	0.806 * *	0.246 *	-0.395 * *	0.610 * *	1.000	
N : P	0.101	-0.351 * *	0.386 * *	-0.422 * *	-0.004	0.461 * *	0.850 * *	-0.359 * *	-0.409 * *	0.429 * *	1.000

注: * 表示显著相关($P<0.05$); * * 表示极显著相关($P<0.01$)。

4 结 论

(1)白刺灌丛沙堆演化阶段对土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤养分含量等土壤理化性质影响显著($P<0.05$)。其中,雏形阶段土壤容重显著高于发育阶段和稳定阶段,毛管孔隙度和非毛管孔隙度随演化阶段分别呈先增后减和逐渐降低的变化趋势。SOC、TN、TP 含量随演化阶段均呈先增后减的变化趋势,且在稳定阶段达到最大值;各演化阶段白刺灌丛沙堆土壤 SOC、TN、TP 均属中等变异。

(2)白刺灌丛沙堆各演化阶段土壤理化性质随土层深度的增加表现出不同的变化趋势。其中,土壤含水量随土层深度增加呈先增后减的变化趋势,且在 50~70 cm 达到最大;pH 逐渐减小,尤其在稳定阶段 pH 变化显著($P<0.05$)。土壤养分除 SOC 外,TN、TP 及其生态化学计量随垂直深度增加变化规律各异。

(3)白刺灌丛沙堆各土壤理化性质和 C : N : P 化学计量比受演化阶段和土层深度的综合影响。其中,演化阶段对土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、pH 和 SOC 均有显著影响($P<0.05$),土层深度对土壤含水量、pH 和 SOC 有显著影响。演化阶段和土层深度对 pH、TN 和 N : P 有明显的交互作用。

(4)白刺灌丛沙堆各土壤理化性质之间及其与生态化学计量比之间存在不同的相关关系。其中 SOC、TN 与 C : N、C : P 均呈显著或极显著相关,说明 SOC、TN 是调控白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量

比的主要因素。为了维护荒漠绿洲过渡带生态系统稳定,应着重保护处于稳定阶段的白刺灌丛沙堆以持续固碳固氮。

参考文献:

[1] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J].New Phytologist,2005,168(2):377-385.

[2] 孙小东,宁志英,杨红玲,等.中国北方典型风沙区土壤碳氮磷化学计量特征[J].中国沙漠,2018,38(6):1209-1218.

[3] 张珂,苏永中,王婷,等.荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J].生态学报,2016,36(11):3235-3243.

[4] Zeng Q C, Liu Y, Fang Y, et al. Impact of vegetation restoration on plants and soil C : N : P stoichiometry on the Yunwu Mountain Reserve of China[J].Ecological Engineering,2017,109:92-100.

[5] 周晓兵,陶冶,吴林,等.塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(3):969-980.

[6] 李从娟,徐新文,孙永强,等.不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C、N、P 的化学计量特征[J].干旱区地理,2014,37(5):996-1004.

[7] 陶冶,刘耀斌,吴甘霖,等.准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局[J].草业学报,2016,25(7):13-23.

[8] 李海亮.秦岭北麓华北落叶松人工林生态系统生态化学计量学研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[9] 张雪妮.荒漠植物群落演替及其营养元素驱动研究[D].

- 乌鲁木齐:新疆大学,2014.
- [10] 刘作云,杨宁,紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤生态学计量特征[J].中国农学通报,2015,31(18):163-167.
 - [11] Wang N, Gao J, Zhang S Q, et al. Variations in leaf and root stoichiometry of *Nitraria tangutorum* along aridity gradients in the Hexi Corridor, northwest China[J].Contemporary Problems of Ecology,2014,7(3):308-314.
 - [12] 牛得草,李茜,江世高,等.阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C : N : P 化学计量比的季节变化[J].植物生态学报,2013,37(4):317-325.
 - [13] 邢磊,刘成功,李清河,等.基于白刺个体大小的生态学计量模型[J].应用生态学报,2020,31(2):366-372.
 - [14] 龚雪伟,吕光辉,马玉,等.艾比湖流域 2 种典型荒漠盐生植物冠下土与叶片的生态化学计量特征[J].林业科学,2017,53(4):28-36.
 - [15] 刘学东,陈林,杨新国,等.白刺沙堆周围土壤理化性状的空间分布特征[J].北方园艺,2016(10):158-163.
 - [16] 杜建会,严平,展秀丽,等.民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素[J].应用生态学报,2008,19(4):763-768.
 - [17] 周义贵.岷江上游干旱河谷区不同土地利用/植被恢复类型土壤生态效益评价[D].四川 雅安:四川农业大学,2014.
 - [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M]3 版.北京:中国农业出版社,2000.
 - [19] Wang X Y, Ma Q L, Jin H J, et al. Change in Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen during the Succession of *Nitraria Tangutorum* in an Arid Desert Area [J].Sustainability,2019,11(4):1-15.
 - [20] 胡国云.河北坝上低山坡地灌丛沙堆形态特征及理化性质研究[D].石家庄:河北师范大学,2016.
 - [21] Jobbágy E E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J].Ecology Applied,2000,10(2):423-436.
 - [22] Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(5):870-879.
 - [23] 卓志清,李勇,兴安,等.东北旱作区土壤碳氮磷生态学计量特征及其影响因素[J].农业机械学报,2019,50(10):259-268,336.
 - [24] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等.乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(17):6247-6256.
 - [25] 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(1/3):139-151.
 - [26] 玉苏甫·买买提,满苏尔·沙比提,娜斯曼·那斯尔丁.焉耆盆地白刺灌丛沙堆土壤理化性质[J].水土保持研究,2015,22(4):91-94,99.
 - [27] 朱媛君,张晓,杨晓晖,等.沙漠—河岸过渡带不同发育类型唐古特白刺沙堆和植株相关指标的比较及关系分析[J].植物资源与环境学报,2018,27(2):9-16.
 - [28] 孙涛,贾志清,钱雅玲,等.民勤荒漠—绿洲过渡带不同发育阶段白刺灌丛沙堆的防风固沙功能分析[J].云南农业大学学报(自然科学),2019,34(4):713-724.
 - [29] 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.
 - [30] 王建林,钟志明,王忠红,等.青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J].生态学报,2014,34(22):6678-6691.
 - [31] Yang X C, Chen L, Zhang Q W, et al. Research progress in the effect of C/P ratio on soil phosphorus availability[J].Hans Journal of Soil Science,2019,7(1):10-15.
 - [32] Axel D, Jens S, Michael S L, et al. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites-Implications for measuring soil carbon stocks[J].Geoderma,2007,141(3/4):272-282.
 - [33] 周晓兵,陶冶,吴林,等.塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(3):969-980.
 - [34] 李新星,刘桂民,吴小丽,等.马衔山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].生态学杂志,2020,39(3):758-765.
 - [35] 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.
 - [36] 宋佳龄,盛浩,周萍,等.亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].环境科学,2020,41(1):403-411.
 - [37] Jobbágy E G, Jackson R B. The uplift of soil nutrients by plants: Biogeochemical consequences across scales [J].Ecology,2004,85(9):2380-2389.
 - [38] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1):99-105.
 - [39] 郭其强,盘金文,李慧娥,等.贵州高原山地马尾松人工林土壤碳、氮、磷生态化学计量特性[J].水土保持学报,2019,33(4):293-298.