

白龙江干旱河谷不同植被土壤碳氮磷化学计量特征

赵 栋^{1, 2}, 王 琪^{1, 2}, 连 娥^{1, 2}, 魏海龙^{1, 2}, 郭 星^{1, 2*}

(1. 甘肃省白龙江林业管理局林业科学研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 舟曲 746300)

摘 要: 探讨不同植被类型土壤碳(C)氮(N)磷(P)含量及生态化学计量特征, 了解不同植被类型土壤养分状况及对土壤的改良效果, 为干旱河谷植被恢复重建中的植被空间分布格局及造林技术提供理论依据和技术指导。采用野外调查与室内分析相结合的方法, 测定了干旱河谷刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、狼牙刺(*Sophora davidii*)、河朔莢花(*Wikstroemia chamaedaphne*)、华西小石积(*Osteomeles schwerinae*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)和荆条(*Vitex negundo*)等主要人工林土壤的碳、氮和磷含量, 运用模糊数学隶属函数法综合评价了不同林型对土壤营养和化学计量特征的影响。白龙江干旱河谷6种植被类型土壤C、N、P含量均处于中下水平; 刺槐、狼牙刺、华西小石积、酸枣和荆条土壤C:N值随土层的加深而升高; 6种植被类型土壤C:P、N:P平均值均远远低于全球平均水平和我国平均水平。6种植被类型对土壤营养元素、化学计量和土壤物理性质改良效果最好的为河朔莢花, 其次为荆条, 再次为刺槐, 因此推荐选择上述3树种作为白龙江干旱河谷造林先锋树种。

关键词: 植被类型; 土壤; 白龙江; 干旱河谷; 生态化学计量

土壤养分含量是衡量土壤肥沃程度的量化指标, 是土壤重要的生态功能^[1]。而碳(C)、氮(N)、磷(P)作为组成植物体的基本元素, 对植物的生长发育及其功能运行具有重要意义, 土壤中N、P元素限制着植物的生长发育^[2-3]。因此, 在土壤养分循环和平衡研究中生态化学计量学日益受到重视^[4]。土壤和植物凋落物是森林生态系统养分的储藏库, 也是植物和土壤间养分传递的枢纽, 凋落物的分解速率、矿化作用、有机质分解、土壤呼吸作用等密切相关, 而生态化学计量学为这方面的研究提供了有效手段。因此, 可利用C、N、P生态化学计量分析揭示生态系统中养分的可获得性以及C、N、P元素的循环、平衡机制与相互制约关系^[5-7]。

白龙江干旱河谷为片岩坡地、砾石岩坡地、砂砾岩坡地等, 土壤粒级小, 土体黏重板结, 养分贫瘠, 地表径流较大, 养分流失严重^[8]。土壤砂砾

化^[9], 进而使土壤更加贫瘠。养分的可利用性在贫瘠的生态系统中显得尤为重要, 是限制盐碱化土壤植被改良的因素之一。为提高白龙江干旱河谷植被覆盖率, 改善当地生态环境, 近年来, 有关单位通过乡土树种造林, 以及相关工程措施和生物措施等进行了大面积人工造林, 开展了白龙江干旱河谷岩生植物持水性能^[10]、主要灌木种群生态位^[11]、白龙江干旱河谷5种灌木抗旱性评价、分析及干旱河谷植物生态适应与植被恢复^[12-13]以及对土壤理化性质的影响^[14]等方面的研究。而在长期的造林过程中, 关于不同树种对土壤营养元素碳氮磷含量的影响以及土壤的碳氮磷化学计量研究较少。因此, 本文对现有主要人工植被土壤养分含量、元素间的化学计量特征进行研究, 了解不同植被类型对白龙江干旱河谷土壤的改良效果, 以期干旱河谷植被恢复重建中的植被空间分布格局及造林技术提供理论依据和技术指导。

1 研究区概况

试验区位于甘肃省陇南市两水林场托塔山, 地处白龙江中游, 介于东经103°51'30"~104°45'30", 北纬33°13'~34°1', 海拔1173~4050 m。大地构造上属南秦岭复合褶皱带, 地势险峻, 地形复杂,

收稿日期: 2019-07-23; 录用日期: 2019-10-30

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目150RJZK179; 甘肃省林业科技计划项目2016kj061, 2015KJ049。

作者简介: 赵栋(1985-), 男, 甘肃会宁人, 高级工程师, 硕士, 主要从事森林生态和森林经营研究。E-mail: 405694634@qq.com。

通讯作者: 郭星, E-mail: gslnwdj@163.com。

沟壑纵横,坡度一般大于 35° ,局部 75° 以上,是典型的高山峡谷区,气候垂直变化十分显著,土壤类型以山地褐土为主。该区属温暖带气候,光热资源丰富,年平均气温 13.1°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年平均积温 $3\,846.1^{\circ}\text{C}$,年平均日照时间 $1\,766.3\text{ h}$,年平均湿度 50% ,日照率 36% ,年均无霜期 223 d ,年太阳总辐射量 $7\,383\text{ J/cm}^2$ 。干旱河谷气候明显,气候炎热少雨且干燥度极大,多年平均降水量为 435.8 mm ,多年平均蒸发量 $1\,972\text{ mm}$,为年均降水量的4倍,旱季雨季两极化,6~9月份降水量占全年降水量的 75.8% 。植被主要由旱中生小叶落叶具刺灌木及耐旱草本(禾草为主)植物组成,主要造林树种为刺槐,狼牙刺、河朔栎花、华西小石积、酸枣、荆条等^[14-16]。

2 研究方法

2.1 样地设置与取样

2017年7月中旬,在研究区内选择生长较为一致的3年生刺槐、狼牙刺、河朔栎花、华西小石积、酸枣、荆条6种植被类型为研究对象(各林型生长状况见表1,土壤物理性质见表2)。在各植被类型林地内设置3个 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的标准样地,每个样地内按“S”型均匀布设5试验样点,分 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 40\text{ cm}$ 3层进行采样,将相同层次土壤样品混合,除去植物根系、动植物残体及石块,装入样品袋低温保鲜运回实验室,风干过 0.25 mm 筛供分析测试土壤的全碳、全氮、全磷等元素(注:下文中碳氮磷均指全碳、全氮和全磷)。

表1 不同植被类型样地概况

植被类型	保存率(%)	郁闭度(%)	平均地径(cm)	平均树高(m)	主要灌木种
刺槐	52.3	0.76	8.2	2.56	荆条,少齿小檗,杭子梢,小叶香茶菜,河朔栎花,小叶石积木,马鞍叶羊蹄甲,川甘亚菊
狼牙刺	47.6	0.43	6.1	1.41	火棘,黄蔷薇,牛奶子,少齿小檗,小叶石积木,川陕花椒,川甘亚菊
河朔栎花	81.3	0.62	1.5	1.22	少齿小檗,荆条,小黄素馨,鼠李,黄蔷薇,堆花小檗,狼牙刺,胡枝子
华西小石积	76.5	0.71	1.8	1.30	少齿小檗,小叶香茶菜,小黄素馨,川甘亚菊,马鞍叶羊蹄甲,堆花小檗
酸枣	53.4	0.56	0.8	0.80	少齿小檗,杭子梢,马鞍叶羊蹄甲,小叶香茶菜,河朔栎花,小叶石积木
荆条	72.6	0.43	1.43	1.20	

注:少齿小檗(*Berberis potaninii*),杭子梢(*Campylotropis macrocarpa*),小叶香茶菜(*Rabdosia parvifolia*),马鞍叶羊蹄甲(*Banahima fabri*),川甘亚菊(*Ajania potaninii*),火棘(*Pyracantha fortuneana*),黄蔷薇(*Rosa hugonis*),牛奶子(*Elaeagnus umbellata*),川陕花椒(*Zanthoxylum piaszekii*),小黄素馨(*Jasminum humile*),鼠李(*Rhamnus davurica*),堆花小檗(*Berberis aggregata*),胡枝子(*Lespedeza bicolor*)

2.2 测定方法

pH值采用电位法,含盐量采用质量法测定,环刀法测土壤容重、土壤总孔隙度。土壤全碳、全氮用元素分析仪(EasyChem Plus全自动化学分析仪)分析,土壤用浓硫酸和高氯酸消解后,钼锑抗比色法测全磷。

2.3 数据处理与分析

采用Excel 2003和SPSS 16软件对数据进行统计分析,土壤C:N、N:P、C:P化学计量比采用质量比表示,通过单因素方差分析(One-Way ANOVA)的LSD法进行显著性检验分析不同林型

各元素的计量比,各元素与比值之间的相关性采用Pearson分析。数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2.4 对土壤化学计量影响的综合评价

不同植被对土壤生态化学计量影响的综合评价采用模糊数学隶属函数法,计算公式为^[17-18]:

$$X_{(u)+} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$X_{(u)-} = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $X_{(u)}$ —隶属函数值; $X_{(u)+}$ —与改良土壤功能呈正相关; $X_{(u)-}$ —与改良土壤功能呈负相关; X_i —各林型土壤的某指标平均值; $X_{\max}$, $X_{\min}$ —各林型土壤中某指标的最大值和最小值。

表 2 不同植被类型样地土壤物理性质

植被类型	土层 (cm)	全盐量 (%)	pH 值	容重 (g · cm ⁻³)	总孔隙度 (%)
刺槐	0 ~ 10	0.23	8.52	1.47	31.64
	10 ~ 20	0.22	8.56	1.52	35.20
	20 ~ 40	0.22	8.55	1.41	33.14
	均值	0.22	8.54	1.47	33.33
狼牙刺	0 ~ 10	0.20	8.76	1.42	29.65
	10 ~ 20	0.21	8.78	1.48	31.88
	20 ~ 40	0.19	8.73	1.39	27.82
	均值	0.20	8.76	1.43	29.78
河朔茺花	0 ~ 10	0.19	8.72	1.46	30.94
	10 ~ 20	0.20	8.72	1.52	33.65
	20 ~ 40	0.22	8.72	1.41	29.65
	均值	0.20	8.72	1.46	31.41
华西小石积	0 ~ 10	0.25	8.93	1.47	31.24
	10 ~ 20	0.23	8.96	1.52	34.79
	20 ~ 40	0.24	8.94	1.50	31.96
	均值	0.24	8.94	1.50	32.66
酸枣	0 ~ 10	0.19	8.78	1.50	31.81
	10 ~ 20	0.21	8.73	1.48	33.12
	20 ~ 40	0.18	8.73	1.44	31.97
	均值	0.19	8.82	1.49	32.53
荆条	0 ~ 10	0.18	8.81	1.47	32.58
	10 ~ 20	0.21	8.79	1.38	30.30
	20 ~ 40	0.22	8.77	1.43	29.57
	均值	0.20	8.79	1.43	30.82

3 结果与分析

3.1 不同林型土壤的 C、N、P 含量

白龙江干旱河谷 6 种植被土壤的变化规律不一致，狼牙刺、华西小石积和酸枣随着土壤深度的增加全碳含量呈“V”字型变化，刺槐随着土壤深度的增加全碳含量呈逐渐上升态势，河朔茺花和荆条则随着土壤深度的增加全碳含量呈逐渐递减趋势。在不同土壤深度中狼牙刺、华西小石积和酸枣土壤的全碳含量均表现为 20 ~ 40 cm > 0 ~ 10 cm > 10 ~ 20 cm，河朔茺花和荆条 2 种植被地的表层土壤 C 含量最高。各林地采样土壤中 C 含量最高为刺槐林，平均含量为 12.33 g · kg⁻¹；其次为华西小石积，含量为 8.70 g · kg⁻¹；最低的是河朔茺花林，为 6.37 g · kg⁻¹（图 1）；

刺槐林 3 层土壤 C 平均含量是河朔茺花林的 1.9 倍。

由图 2 可知，6 种植被类型土壤 N 含量均在 0 ~ 10 cm 层最高，除刺槐、狼牙刺林外，其余林地 0 ~ 10 cm 土壤 N 含量均显著高于 10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层（*P* < 0.05），酸枣林土壤表层 N 含量最高，为 0.91 g · kg⁻¹。各林地采样土壤中 N 含量平均值表现为酸枣 > 刺槐 > 狼牙刺 > 华西小石积 > 河朔茺花 > 荆条，其中酸枣林 N 平均含量是荆条林的 1.4 倍。

由图 3 可以看出，6 种植被类型 3 层土壤 P 含量分布规律不一致。刺槐、河朔茺花和酸枣土壤中 P 随土层深度的增加呈“V”型分布，在 10 ~ 20 cm 土壤 P 含量最低；狼牙刺、华西小石积土壤中 P 随土层深度的增加呈倒“V”型分布，而荆条土壤中 P 随土壤深度的增加含量降低。

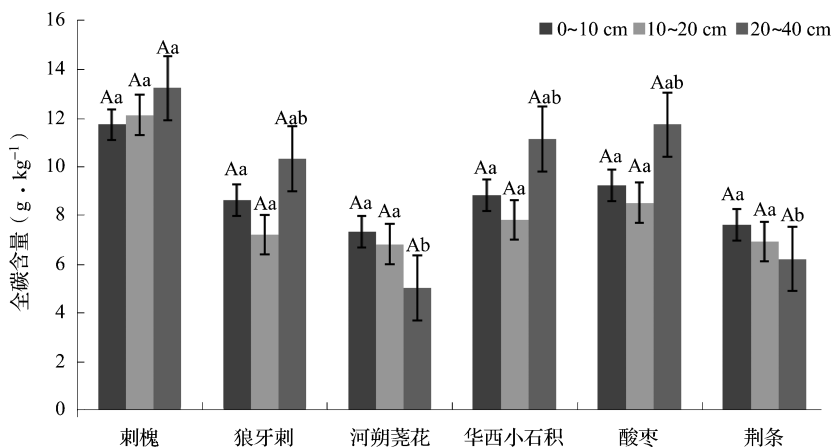


图 1 不同植被类型土壤全碳含量

注：不同大写字母表示同一类型植被不同土层土壤间的差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示不同植被类型同一土层土壤间的差异显著 ($P<0.05$)，下同。

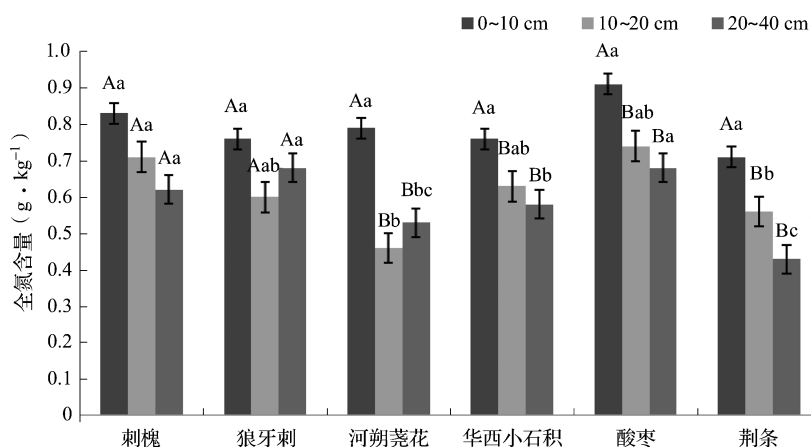


图2 不同植被类型土壤全氮含量

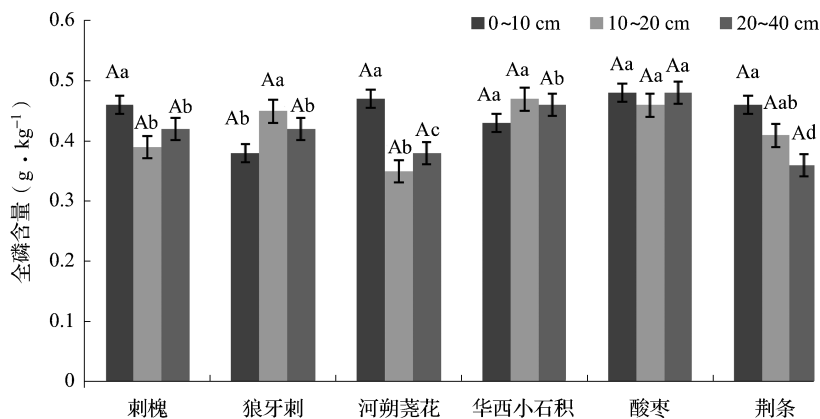


图3 不同植被类型土壤全磷含量

分析比较不同植被同层间的土壤 P 含量, 狼牙刺表层土壤 P 含量显著低于其他林地 ($P<0.05$), 在 10 ~ 20 cm 狼牙刺、华西小石积、酸枣土层的 P 含量均显著高于其他各林 ($P<0.05$), 在 20 ~ 40 cm 酸枣土层的 P 含量均显著高于其他各林 ($P<0.05$)。

各植被类型 3 层土壤 P 平均含量最高的是酸枣林, 含量为 $0.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最低为河朔栎花林, 含量为 $0.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者是后者的 1.1 倍。

3.2 不同植被类型土壤各元素化学计量比

由表3可知,不同植被类型和同种植被类型

不同土壤深度 C : N 比值差异不显著 ($P>0.05$)。刺槐、狼牙刺、华西小石积、酸枣和荆条土壤 C : N 随土壤深度增加而升高, C : N 比值变化为 0 ~ 10 cm < 10 ~ 20 cm < 20 ~ 40 cm, 其比值范围在 14.03 ~ 25.61 之间, 河朔堯花 C : N 随土壤深度增加呈先升后降趋势, 在 10 ~ 20 cm C : N 最高, 为 18.8。

表 3 不同植被类型土壤元素化学计量比特征

计量比	土层 (cm)	植被类型					
		刺槐	狼牙刺	河朔堯花	华西小石积	酸枣	荆条
C : N	0 ~ 10	18.1 ± 4.6Aa	15.4 ± 5.3Aa	13.2 ± 1.9Aa	15.6 ± 6.5Aa	14.3 ± 1.8Aa	14.7 ± 5.6Aa
	10 ~ 20	21.3 ± 9.7Aa	16.2 ± 6.1Aa	18.8 ± 5.8Aa	16.4 ± 9.1Aa	15.5 ± 9.1Aa	16.3 ± 7.7Aa
	20 ~ 40	25.6 ± 11.2Aa	19.1 ± 13.8Aa	13.4 ± 8.2Aa	23.3 ± 7.8Aa	21.2 ± 13.4Aa	18.4 ± 12.2Aa
C : P	0 ~ 10	27.4 ± 3.1Aa	24.6 ± 3.8Aa	17.5 ± 8.1Aa	22.5 ± 5.6Aa	21.2 ± 7.3Aa	18.5 ± 4.6Aa
	10 ~ 20	32.2 ± 5.8Aa	18.1 ± 5.6Aa	21.4 ± 6.3Aa	18.6 ± 8.2Aa	20.5 ± 5.4Aa	17.8 ± 5.3Aa
	20 ~ 40	31.4 ± 6.7Aa	24.5 ± 9.7Aa	15.2 ± 2.2Aa	25.1 ± 12.1Aa	24.4 ± 1.3Aa	19.2 ± 8.2Aa
N : P	0 ~ 10	1.4 ± 0.3Aa	1.7 ± 0.1Aa	1.5 ± 0.1Aa	1.6 ± 0.1Aa	1.6 ± 0.2Aa	1.2 ± 0.1Aa
	10 ~ 20	1.3 ± 0.2Aa	1.3 ± 0.1Aa	1.1 ± 0.1Aa	1.4 ± 0.2Aa	1.2 ± 0.3Aa	1.0 ± 0.2Aa
	20 ~ 40	0.9 ± 0.1Aa	1.5 ± 0.3Aa	1.2 ± 0.1Aa	1.1 ± 0.2Aa	1.1 ± 0.2Aa	0.8 ± 0.1Aa

注: 表中数据为平均值 ± 标准差。字母标记为 LSD 比较结果, 同列不同大写字母表示同一类型植被不同土层土壤间的差异显著 ($P<0.05$), 同行不同小写字母表示不同植被类型土壤间的差异显著 ($P<0.05$)。

不同植被类型不同土壤深度 C : P 的变化规律不一致, 其范围为 15.2 ~ 32.2, 刺槐林最高, 河朔堯花林最低。分析发现: 刺槐、河朔堯花 C : P 随土层深度的增加呈倒“V”型分布, 狼牙刺、酸枣、华西小石积和荆条则呈“V”型分布。华西小石积、酸枣、荆条土壤的 C : P 比值变化为 10 ~ 20 cm < 0 ~ 10 cm < 20 ~ 40 cm; 刺槐、河朔堯花不同土层中 10 ~ 20 cm C : P 值最高, 分别为 32.2 和 21.4。刺槐、华西小石积、酸枣和荆条 N : P 随土层的加深而降低, 狼牙刺和河朔堯花 N : P 随土层的

加深先降后升趋势。
3.3 土壤化学计量特征与各元素的关系
由表 4 相关分析可知, 土壤 C 与 N、P、N : P 呈不显著正相关, 与 C : N、C : P 呈极著正相关 ($P<0.01$); N 与 P、C : P 呈不显著正相关, 与 C : N 呈不显著负相关, 与 N : P 呈极著正相关 ($P<0.01$); P 与 C : N 呈负相关, 与 N : P、C : P 呈正相关; C : N 与 C : P 呈极著负相关 ($P<0.01$), 与 N : P 呈负相关; C : P 与 N : P 呈不显著正相关。

表 4 土壤养分含量与生态化学计量比之间的相关系数

	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	1					
N	0.185	1				
P	0.32	0.406	1			
C : N	0.747**	-0.317	-0.103	1		
C : P	0.930**	0.079	0.042	-0.810**	1	
N : P	0.335	0.636**	0.152	-0.281	0.324	1

注: ** 表示在 0.01 水平呈极显著相关性, * 表示在 0.05 水平呈显著相关性。

3.4 不同植被类型对土壤碳氮磷生态化学计量的影响评价
由表 5 可知, 刺槐土壤隶属函数指标较高的为总孔隙度、土壤容重和 P, 刺槐对土壤的改良作用

表现在物理性质和土壤养分状况方面; 狼牙刺土壤隶属函数指标较高的为 C : N、pH 值和 C, 其对土壤的改良作用表现在化学计量特征、物理性质和土壤养分状况方面; 河朔堯花土壤隶属函数指标较高

的为土壤容重、C:P 和总孔隙度，其对土壤的改良作用表现在物理性质和化学计量特征方面；华西小石积土壤隶属函数指标较高的为 P、土壤容重和总孔隙度，对土壤的改良作用表现在土壤养分状况和物理性质方面；酸枣和荆条土壤隶属函数指标较高

的为 N 和 pH 值，对土壤的改良作用表现在土壤养分状况和物理性质方面。由隶属函数值可知，6 个树种土壤改良效果强弱排序为河朔栌花 > 荆条 > 刺槐 > 酸枣 > 狼牙刺 > 华西小石积。因此河朔栌花、荆条和刺槐可作为白龙江干旱河谷造林先锋树种。

表 5 不同植被类型土壤隶属函数值

指标	植被类型					
	刺槐	狼牙刺	河朔栌花	华西小石积	酸枣	荆条
C ⁺	0.010	0.168	0.153	0.003	0.093	0.107
N ⁺	0.068	0.051	0.014	0.138	0.189	0.111
P ⁺	0.214	0.069	0.021	0.159	0.060	0.105
C : N ⁻	0.024	0.219	0.144	0.058	0.149	0.109
C : P ⁺	0.145	0.106	0.178	0.042	0.109	-0.101
N : P ⁻	0.070	0.069	0.021	0.154	0.185	0.107
pH 值 ⁻	0.192	0.176	0.148	0.142	0.180	0.110
全盐量 ⁻	0.156	0.159	0.138	0.153	0.002	0.108
土壤容重 ⁻	0.162	0.128	0.182	0.157	0.165	0.057
总孔隙度 ⁺	0.226	0.151	0.175	0.130	0.080	0.108
隶属函数值	0.371	0.172	0.490	0.156	0.355	0.387
改良效果排序	3	5	1	6	4	2

注：+ 表示正指标；- 表示负指标。

4 讨论

白龙江干旱河谷 6 种植被土壤 C、N、P 3 种元素平均含量范围分别为 5.0 ~ 13.2、0.46 ~ 0.83 和 0.35 ~ 0.48 g · kg⁻¹。土壤 C、N、P 含量均处于全国中下水平（有机质 <10 g · kg⁻¹ 为全国的最低水平，N<0.65 g · kg⁻¹ 为全国的最低水平，0.4 g · kg⁻¹< 全 P<0.8 g · kg⁻¹ 为中水平），P 的含量低于全国的平均含量（0.56 g · kg⁻¹）^[19]，并且远远低于地壳 P 的平均含量（2.8 g · kg⁻¹）^[20]。这可能与干旱河谷土壤类型有关，土壤粒级小，土壤容重大，土壤持水性差，地表径流大，这些因素限制了土壤中有有机物质的积累、分解和迁移，因此土壤 C、N、P 含量较低。土壤 N 含量小于全国的最低水平，表明该区域氮素缺乏，在植被恢复过程中，应注重添加适量氮肥。土壤 P 的来源相对固定，绝大部分不能为植物直接吸收利用，易被植物吸收利用的水溶性磷和弱酸溶性磷通常含量很少；另外，磷元素不易从表土中向下移动到深层被植物根系吸收，尤其粘粒多的土壤更不易移动，白龙江干旱河谷地的土质砂砾

化，盐碱化土壤中钙离子含量高，降低了土壤磷的有效性，使得土壤中磷易流失，因此其 P 含量较低。

刺槐、狼牙刺、华西小石积、酸枣和荆条土壤 C:N 值随土层的加深而升高，这是由于该地地表径流大引起地表碳流失，逐渐富集在土壤下层，这与陶冶等^[21]、周正虎等^[22] 研究结果一致。而河朔栌花 C:N 在 10 ~ 20 cm 最高。6 种森林类型 C:N 变化规律不一致，其范围为 13.4 ~ 25.6，可能是树种间的差异一定程度上影响土壤 C:N 的垂直分布^[22-23]，河朔栌花和荆条 2 种物种木质化程度低，凋落物相对较易分解，凋落物富集在土壤表层，氮素含量最高，土壤 C:N 值低，随着土层深度的增加，氮素归还效应减弱，土壤氮含量下降，土壤 C:N 值高。表明该地区有机质分解速率慢，矿化作用水平低，造成土壤中可利用的营养元素降低。

土壤 C:P 是衡量微生物矿化土壤有机物质释放 P 或从环境中吸收固持 P 潜力的一种指标，是土壤 P 矿化能力的标志，土壤 C:P 低有利于微生物分解有机质释放养分，促进土壤中有效 P 含量的增加，其有效性高；而高 C:P 会导致微生物与植

物竞争土壤的无机 P, 从而不利于植物的生长。本研究的刺槐、河朔堯花和荆条土壤 C:P 随土层的加深先升后降, 最大值均出现在 10 ~ 20 cm, 分别为 32.2、21.4 和 17.8, 狼牙刺、酸枣和华西小石积的土壤 C:P 随土层的加深先降后升, 其最小值分别为 18.1、18.6 和 20.5。6 种植被类型土壤 C:P (15.2 ~ 32.2) 远低于我国平均值 (136) 和全球平均值 (186), 表明该区域土壤 P 为净矿化, 土壤磷有效性较高。

N:P 作为 N 饱和的诊断指标, 并被用于确定养分限制的阈值^[24-25]。刺槐、华西小石积、酸枣和荆条的 N:P 随土层的加深而降低, 狼牙刺和河朔堯花的 N:P 随土层的加深先降后升, 但 6 种植被类型土壤的 N:P 平均值 (1.3) 远远低于全球平均水平 (5.9) 和我国平均水平 (3.9)^[26], 说明该区域人工林受到严重的土壤 N 限制, 这与温带地区土壤类似, 如黄土丘陵土壤 N:P 为 0.86, 为显著的氮缺乏^[27-29]。

5 结论

白龙江干旱河谷 6 种植被类型土壤 C、N、P 含量均处于全国中下水平; 刺槐、狼牙刺、华西小石积、酸枣和荆条土壤的 C:N 值随土层的加深而升高; 6 种植被类型土壤的 C:P、N:P 平均值均远远低于全球平均水平和我国平均水平。该地区人工林受到严重的土壤 C、N 限制, 相关分析表明, 土壤 C 与 N、P 呈极显著或显著正相关关系。通过对不同森林类型土壤指标隶属函数综合评价来看, 6 种人工林对土壤营养元素、化学计量和土壤物理性质改良作用最好的为河朔堯花, 其次为荆条, 再次为刺槐, 应选择河朔堯花、荆条和刺槐乡土树种作为白龙江干旱河谷造林树种。一方面增加固氮植物刺槐与其他植被的混合种植, 增加土壤中氮的含量; 另一方面减少人为干扰, 增加林地凋落物的总量, 促进人工林生态系统植被-微生物-土壤间物质与养分的良性循环。

参考文献:

- [1] 王晶, 张旭东, 解宏图, 等. 现代土壤有机质研究中新的量化指标概述 [J]. 应用生态学报, 2003, (10): 1809-1812.
- [2] 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.
- [3] 颜晓, 卢志红, 魏宗强, 等. 几种典型酸性旱地土壤磷吸附

- 的关键影响因素 [J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 1-7.
- [4] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications and nitrogen-phosphorus interactions [J]. Ecological Applications, 2010, 20 (1): 5-15.
- [5] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性 [J]. 生态学报, 2016, 36 (14): 4363-4372.
- [6] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 等. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望 [J]. 土壤, 2016, 48 (1): 29-35.
- [7] 于维水, 王碧胜, 王士超, 等. 长期不同施肥下我国 4 种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征 [J]. 中国土壤与肥料, 2018, (2): 29-34.
- [8] 刘艳锋, 陈学华, 贺秀斌, 等. 岷江上游土壤侵蚀与土地利用的耦合关系研究 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24 (5): 161-165, 185.
- [9] 秦纪洪, 赵利坤, 孙辉, 等. 岷江上游干旱河谷旱地土壤斥水性特征初步研究 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (1): 259-262, 272.
- [10] 陈国鹏, 曹秀文, 王会儒, 等. 白龙江干旱河谷岩生植物持水性 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (1): 102-105.
- [11] 王飞, 郭星, 陈国鹏, 等. 甘肃白龙江干旱河谷主要灌木种群生态位研究 [J]. 陕西林业科技, 2015, (4): 1-7.
- [12] 郭星, 谢飞, 闫倩倩, 等. 黄腐酸对白龙江干旱河谷 5 种苗木抗旱性的影响 [J]. 草业学报, 2018, 27 (8): 86-94.
- [13] 谢飞, 闫倩倩, 郭星, 等. 白龙江干旱河谷 5 种灌木抗旱性评价及分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38 (8): 51-56.
- [14] 赵栋, 屠彩芸, 李丹春. 封育年限对干旱河谷灌丛土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持通报, 2017, 37 (2): 39-44, 49.
- [15] 王飞, 屠彩芸, 曹秀文, 等. 白龙江干旱河谷不同坡向主要灌丛群落随海拔梯度变化的物种多样性研究 [J]. 植物研究, 2018, 38 (1): 26-36.
- [16] 王飞, 王永元, 杨萌萌, 等. 干旱河谷草本植物随海拔变化的物种多样性 [J]. 森林与环境学报, 2017, 37 (4): 471-476.
- [17] 陈超. 喀斯特地区饲用灌木抗旱抗寒性的生理生态学机制研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [18] 陈印平, 夏江宝, 赵西梅, 等. 黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 土壤通报, 2017, 48 (2): 392-398.
- [19] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (3): 659-665.
- [20] 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: 2665-2673.
- [21] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2016, 27 (7):

- 2239–2248.
- [22] 周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35 (20): 6694–6702.
- [23] 熊平生. 陆地生态系统土壤呼吸的影响因素研究综述 [J]. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 1–7.
- [24] Zhao F, Kang D, Han X, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity [J]. Ecological Engineering, 2015, 74: 415–422.
- [25] Tessier J T, Raynal D J. 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: 523–534.
- [26] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a ‘Redfield ratio’ for the microbial biomass [J]. Biogeochemistry, 2007, 85: 235–252.
- [27] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 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 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (1): 247–259.
- [28] 程欢, 宫渊波, 吴强, 等. 川西亚高山 / 高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征 [J]. 自然资源学报, 2018, 33 (1): 161–172.
- [29] 吴鹏. 茂兰喀斯特森林自然恢复过程中植物叶片 – 凋落物 – 土壤生态化学计量特征研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.

Effect of different vegetation types on soil ecological stoichiometry in Bailong river

ZHAO Dong^{1, 2}, WANG Qi^{1, 2}, LIAN E^{1, 2}, WEI Hai-long^{1, 2}, GUO Xing^{1, 2*} (1. Institute of Forestry Science, Bailongjiang Forestry Management Bureau of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730070; 2. Gansu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu Gansu 746300)

Abstract: In order to understand the artificial forest soil nutrient status and amelioration effects, the soil contents of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) and ecological stoichiometric characteristics of different vegetation types were analyzed to provide the theoretical basis and technical guidance for the spatial distribution pattern and technology of afforestation for vegetation restoration. The changes of C, N and P contents of the six different vegetation types of artificial forest, i.e. *Robinia pseudoacacia*, *Sophora davidii*, *Wikstroemia chamaedaphne*, *Osteomeles schwerinae*, *Ziziphus jujube*, *Vitex negundo*, were measured with field investigation and laboratory analysis, and the effects of different vegetation types on soil nutrient and stoichiometric characteristics were evaluated by fuzzy mathematic membership function method. The soil C, N and P contents in artificial forest of different vegetation types were relatively low, and were in the middle and lower levels in dry-hot valley region in Bailong river. The soil C : N ratio of the *Robinia pseudoacacia*, *Sophora davidii*, *Osteomeles schwerinae*, *Ziziphus jujube*, *Vitex negundo* were increased with the increasing soil depth. The average soil C : P and N : P ratios of the six vegetation types were much lower than the average value of the global countries or China. The most effective vegetation type for amelioration on soil nutrient elements, stoichiometry and soil physical properties was the *Wikstroemia chamaedaphne*, followed by *Vitex negundo* and then by *Robinia pseudoacacia*. Therefore, these three species were recommended as the pioneer species of afforestation in dry-hot valley region in Bailong river.

Key words: vegetation type; soil; Bailong river; arid valley; ecological stoichiometry