

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220528

# 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿主要养分元素的分配及循环特征

李清雪<sup>1,2</sup>, 贾志清<sup>1,2,3\*</sup>, 何凌仙子<sup>1,2</sup>, 赵雪彬<sup>2</sup>, 羊秀本<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 2. 青海共和荒漠生态系统定位观测研究站, 青海 共和 813005; 3. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 了解沙地人工植被恢复过程中主要养分元素的分配及循环特征有助于全面地认识植物适应环境的策略, 为沙地植被的管理提供理论依据。[方法] 以高寒沙地 6、9、11、17 和 31 年生中间锦鸡儿人工灌木林为研究对象, 采用野外标准株全株收获法, 对人工林 N、P 和 K 3 种主要养分元素的含量、积累、分配和生物循环特征进行研究。[结果] (1) 各组分中, 叶和皮的养分含量最高, 干的养分含量最低; 随着林龄的增加, 3 个径级根系 (粗根: 直径 > 5 mm、中根: 2 mm < 直径 ≤ 5 mm、细根: 直径 ≤ 2 mm) N 含量和叶片 P 含量显著增加, 细根的 P 和 K 含量、枝和中根的 K 含量显著降低; 3 个径级根系 N 含量与细根 P 和 K 含量呈极显著的负相关关系, 中根和细根的 N 含量与枝和中根的 K 含量呈极显著的负相关关系。(2) 根系养分积累量大于地上组分, 其占总养分积累量的百分比随林龄的增加先增加后降低, 在 17 年生人工林达到峰值, N、P 和 K 积累量百分比分别达 70%、66% 和 63%。(3) 随着林龄增加, 3 种养分元素的利用系数降低, 循环系数和周转期增加; K 的利用系数和循环系数明显大于 N 和 P, 周转期明显小于 N 和 P。[结论] 高寒沙地中间锦鸡儿人工灌木林生长过程中将更多的养分分配给根系来适应严酷的自然环境, 其固氮过程会消耗自身的 K 和 P, 其中, K 元素的循环速率较快, 流动性大。因此, 建议对中间锦鸡儿人工灌木林的管护过程中适当添加 K 肥和 P 肥。

**关键词:** 中间锦鸡儿人工灌木林; 养分; 分配; 循环; 高寒沙地

**中图分类号:** S793.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)03-0119-10

林分养分的积累与分布是研究森林生态系统物流和能流的基础, 养分循环是系统功能的主要表现之一, 直接影响着生产力的高低和生态系统的稳定与持续, 是生态系统的主要功能之一<sup>[1]</sup>。植物体养分元素的积累取决于生物量的积累以及各器官中养分元素的含量<sup>[2]</sup>。植物生物量分配是其更好的适应环境变化的策略, 植物能够很好地调节各组分的相对生长, 其各组分生物量的比例会随生境和个体大小等变化而变化<sup>[3]</sup>。当某些环境因子成为植物生长发育的限制性因素时, 植物为了保证其正常生长,

就会不断的调整营养物质的分配以及改变根冠比等指标来适应环境<sup>[4]</sup>。有关生物量在植物体不同组分分配的研究受到了生态学者们的广泛关注<sup>[5-6]</sup>。有些学者用异速生长理论预测了生物量在植物组分间的分配, 认为叶、茎、根是同速生长<sup>[7]</sup>。还有一些学者发现, 生物量的分配与营养元素的分配存在相关性, 但大部分研究是关于乔木植物和草本植物的<sup>[8-10]</sup>。在干旱半干旱地区的沙化土地上, 灌木是人工植被恢复的主要植被类型, 锦鸡儿属 (*Caragana* Fabr.) 灌木是植被恢复采用的重要树

收稿日期: 2022-11-02 修回日期: 2022-12-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2019MA008)、国家重点研发计划课题 (2022YFF1302503-2)、中国林业科学研究院林业研究所林木培育重点实验室专项资金 (ZDRIF20190) 资助

\* 通讯作者: 贾志清, 研究员, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究. E-mail: jiazq369@caf.ac.cn

种。有学者对锦鸡儿属植物的生物量分配及生物量建模<sup>[11-12]</sup>、生长指标及化学计量指标与基质关系<sup>[13]</sup>、干旱胁迫对幼苗 C、N、P 分配影响机理<sup>[14]</sup> 等进行了研究, 但关于锦鸡儿属植物在植被恢复过程中主要养分元素含量、积累、分配和循环方面的研究还鲜有报道。因此, 对于干旱半干旱沙化生态系统锦鸡儿属灌木主要养分元素含量、积累、分配和循环特征进行研究, 了解其适应环境的策略, 为脆弱沙化生态系统灌木人工林的可持续经营管理提供依据, 还可为合理计算灌木人工林养分储量及评估其生长潜力提供技术支撑。

共和盆地是青藏高原生态屏障重要构成部分, 是青海省荒漠化与沙化土地的典型代表, 与其他沙漠化地区相比, 具有海拔高、气温低、无霜期短, 自然环境条件比较严酷, 生态系统脆弱的特性。中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu) 为多年生豆科锦鸡儿属灌木, 是青海共和高寒沙地植被恢复的主要物种。目前, 中间锦鸡儿灌木人工林在共和盆地沙地大面积分布。关于高寒沙地中间锦鸡儿的研究多集中在水分利用策略<sup>[15-16]</sup>、土壤改良效应<sup>[17-18]</sup> 等方面。本研究拟通过对高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿灌木人工林主要养分元素分配及循环特征进行系统研究, 阐明各组分主要养分元素含量、积累、分配和循环特征随林龄的变化趋势, 进而揭示中间锦鸡儿人工灌木林在恢复过程中的资源分配策略及其生态功能, 以期为高寒沙地人工植被的经营管理及青藏高原生态屏障区生态保护和修复工程实施提供理论依据和决策参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本研究在国家林业局青海共和荒漠生态系统定位观测站进行, 该站位于青藏高原东北部的青海省海南州共和县沙珠玉乡 (100°16' E, 36°16' N), 海拔 2 871 m。气候类型属于高寒干旱荒漠和半干旱草原过渡区域。年均气温 2.4 °C, 年均降水量 246.3 mm, 年均潜在蒸发量 1 716.7 mm, 无霜期年平均 91 d。研究区内以人工固沙植被为主: 主要物种有乔木青杨 (*Populus cathayana* Rehd.)、小叶杨 (*Populus simonii* Carr.), 灌木主要为中间锦鸡儿、柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、乌柳 (*Salix cheilophila* Schneid.) 和沙

柳 (*Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang) 等。

### 1.2 试验设计及取样

2017年7月中旬, 在研究区选择2011、2008、2006、2000和1986年种植的中间锦鸡儿人工灌木林(即6、9、11、17和31年生)为研究对象, 人工林均为线性条播, 行间距为2 m。在每个人工林内随机设置3个20 m × 20 m的样方为3个重复。在每个样方内随机选取1 m长的灌丛为标准株, 以1 m长的灌丛为中心向两侧分别延伸1 m(到2条中间锦鸡儿灌丛带的中间位置)为取样面积(1 m × 2 m)。取样时, 采用直接收割法, 将选出的标准灌丛从基部剪下, 分为叶、枝、干、皮。然后按照取样面积挖取0~80 cm深度的根系, 即中间锦鸡儿根系主要分布区<sup>[19]</sup>, 并将根系分为粗根(直径 > 5 mm)、中根(2 mm < 直径 ≤ 5 mm)和细根(直径 ≤ 2 mm)3个径级。将样品带回实验室, 65 °C 恒温烘干至质量恒定, 测干质量。

取样完成后, 在每个样方内随机设置6个相同的尼龙网枯落物收集框(1 m × 1 m), 9、10月份收集枯落物, 并将每个收集框的枯落物分别装袋。样品带回实验室置于65 °C 干燥箱中烘干至恒质量, 称量干质量。

### 1.3 养分含量测定

将所有样品进行粉碎, 并过0.25 mm筛, 测定N、P和K含量。采用元素分析法测定N含量(元素分析仪: vario EL III, CHNOS Elemental Analyzer, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany), 采用HNO<sub>3</sub>消解-ICP法测定P和K含量(电感耦合等离子体发射光谱仪 iCAP 6300 ICP-OES Spectrometer, Thermo Scientific, USA)。样品测试地点为中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室。

### 1.4 养分循环参数的计算

采用养分元素积累量、年存留量、年吸收量和年归还量计算养分利用系数、循环系数和周转期等参数来分析养分循环特征<sup>[8]</sup>。具体参数计算如下:

贮存量: 各组分养分元素积累量之和。

存留量: 林分年增长生物量与其养分含量的乘积。

归还量: 林分枯落物量与其养分含量乘积。

吸收量 = 存留量 + 归还量

利用系数 = 吸收量/贮存量

循环系数 = 归还量/吸收量

周转期 = 贮存量/归还量

## 1.5 数据分析

采用单因素方差分析和 Duncan 法分析不同林龄和不同组分养分含量之间的差异性, 不同林龄枯落物量、养分含量及养分积累量之间的差异性。采用相关分析和冗余分析 (RDA) 法分析各组分 N 含量与 P、K 含量的相关分析。所有数据使用 SPSS 19.0 和 CANOCO 4.5 进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 各组分生物量及养分含量

中间锦鸡儿人工灌木林各组分生物量随着林龄的增加显著增加 ( $p < 0.001$ ) (表 1), 各林龄根系生物量占比高于地上组分, 为 54.60%~71.57%, 17 年生人工灌木林根系生物量占比最高 (71.57%)。

表 1 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林生物量 (平均值  $\pm$  标准差,  $n = 3$ )

Table 1 Biomass of *C. intermedia* plantations of different stand age (means  $\pm$  SD,  $n = 3$ )

林龄 Age/a	林分生物量 Stand biomass / (t·hm <sup>-2</sup> )							
	叶 Leaves	枝 Branches	皮 Stem bark	干 Stem wood	粗根 Coarse root	中根 Medium root	细根 Fine root	合计 Total
6	1.07 $\pm$ 0.02 Ac	1.40 $\pm$ 0.10 Ad	0.13 $\pm$ 0.03 Aa	0.24 $\pm$ 0.07 Aa	3.32 $\pm$ 0.15 Ae	0.94 $\pm$ 0.05 Ac	0.42 $\pm$ 0.01 Ab	7.51 $\pm$ 0.41 A
9	1.24 $\pm$ 0.02 Bc	2.42 $\pm$ 0.44 Ad	0.19 $\pm$ 0.02 Aa	0.41 $\pm$ 0.05 ABab	4.22 $\pm$ 0.06 Ae	1.03 $\pm$ 0.05 Ac	0.51 $\pm$ 0.03 ABb	10.02 $\pm$ 0.66 AB
11	1.30 $\pm$ 0.02 Bd	3.23 $\pm$ 0.05 Ae	0.25 $\pm$ 0.02 Aa	0.51 $\pm$ 0.02 Bb	6.20 $\pm$ 0.10 Bf	1.16 $\pm$ 0.05 Ac	0.58 $\pm$ 0.02 Bb	13.23 $\pm$ 0.26 B
17	1.41 $\pm$ 0.02 Cc	4.02 $\pm$ 0.24 Ad	0.26 $\pm$ 0.03 Aa	0.51 $\pm$ 0.16 Bab	12.91 $\pm$ 0.58 Ce	1.81 $\pm$ 0.14 Bc	0.89 $\pm$ 0.08 Cb	21.81 $\pm$ 1.08 C
31	1.95 $\pm$ 0.11 Da	11.39 $\pm$ 3.09 Bb	0.95 $\pm$ 0.28 Ba	1.77 $\pm$ 0.23 Ca	15.79 $\pm$ 2.10 Dc	2.57 $\pm$ 0.47 Ca	0.97 $\pm$ 0.16 Ca	35.40 $\pm$ 5.55 D

注: 不同大写字母表示同一组分不同林龄之间差异显著, 不同小写字母表示同一林龄不同组分之间差异显著 ( $p < 0.05$ )

Notes: Values followed by different uppercase letters indicate a significant difference among the stand age; different lowercase letters indicate a significant difference among the components according to Duncan's multiple range test ( $p < 0.05$ )

从各组分养分含量随林龄增加的 RDA 排序图也可以看出: 粗根、中根、细根的 N 含量及叶的 P 含量与林龄呈明显的正相关, 细根、中根和枝的 K 含量及细根的 P 含量与林龄呈明显的负相关 (图 1)。各组分 N 含量与 P 和 K 含量相关分析和 RDA 分析结果 (表 3, 图 1) 表明: 粗根、中根和细根的 N 含量与叶的 P 含量呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与细根的 P 和 K 含量呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ); 中根和细根的 N 含量与枝和中根的 K 含量呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ); 粗根 N 含量与枝的 K 含量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 中根的 N 含量与皮的 K 含量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )。

### 2.2 各组分养分积累及分配

根据中间锦鸡儿人工灌木林各组分生物量和养

各组分生物量中, 粗根的生物量占比最高 (42.12%~59.19%), 其次为枝 (18.43%~32.18%), 叶 (5.51%~14.25%) 和中根 (7.26%~12.52%)、细根 (2.74%~5.59%) 和干 (2.34%~5.00%) 生物量占比相对较低, 皮的生物量占比最低 (1.19%~2.68%), 叶、中根和细根生物量占比随着林龄的增加而降低。

表 2 表明: 各组分 N 含量为 13.03~39.59 g·kg<sup>-1</sup>, P 含量为 0.86~2.25 g·kg<sup>-1</sup>, K 含量为 3.48~21.28 g·kg<sup>-1</sup>, N 和 K 含量整体表现为叶 > 皮 > 细根 > 中根 > 枝 > 粗根 > 干的趋势, P 含量为叶 > 皮 > 枝 > 粗根 > 中根 > 细根 > 干的趋势。

各径级根系 N 含量和叶片 P 含量随林龄增加显著增加 ( $p < 0.05$ ); 细根 P 含量以及枝、细根和中根的 K 含量随林龄增加显著降低 ( $p < 0.05$ )。

分元素含量可以计算出养分积累量及其分配。由表 4 可知: 各组分养分积累量随着林龄的增加而增加。各组分 N 积累量为 3.09~399.99 kg·hm<sup>-2</sup>, P 积累量为 0.19~17.53 kg·hm<sup>-2</sup>, K 积累量为 1.03~120.24 kg·hm<sup>-2</sup>, 整体为粗根 > 枝 > 叶 > 中根 > 细根 > 皮 > 干。

叶养分积累量占总养分积累量的百分比随林龄的增加而降低 (图 2)。根系养分积累量占总养分积累量的百分比随林龄的增加先增加后降低, 在 17 年生人工林达到峰值, N、P 和 K 积累量百分比分别为 70%、66% 和 63%。

### 2.3 枯落物量及养分含量

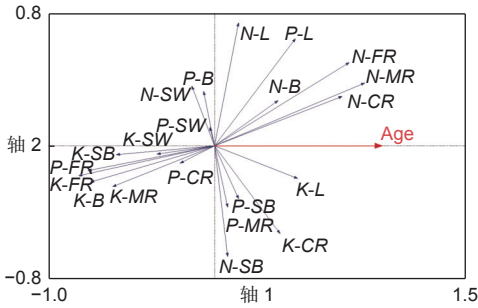
不同林龄人工灌木林枯落物量为 1.06~2.05 t·hm<sup>-2</sup>, 随着林龄的增加显著增加 ( $p <$

表 2 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林养分含量 (平均值  $\pm$  标准差,  $n = 3$ )Table 2 Nutrient concentrations of *C. intermedia* plantations of different stand age (means  $\pm$  SD,  $n = 3$ )

林龄 Age/a	组分 Components	养分含量 Nutrient concentration / (g·kg <sup>-1</sup> )		
		N	P	K
6	叶 Leaves	37.70 $\pm$ 1.31 Af	1.74 $\pm$ 0.16 Ad	19.20 $\pm$ 0.22 Ae
	枝 Branches	24.67 $\pm$ 1.19 Ac	1.38 $\pm$ 0.09 Bc	8.67 $\pm$ 0.08 Cc
	皮 Stem bark	32.24 $\pm$ 0.74 Ae	1.43 $\pm$ 0.08 Ac	10.18 $\pm$ 0.30 Ad
	干 Stem wood	13.08 $\pm$ 1.93 Aa	0.91 $\pm$ 0.16 Aa	4.35 $\pm$ 0.42 Aa
	粗根 Coarse root	22.70 $\pm$ 0.78 ABb	1.18 $\pm$ 0.01 Ab	7.55 $\pm$ 0.09 CDb
	中根 Medium root	25.05 $\pm$ 0.59 Ac	1.17 $\pm$ 0.04 Bb	8.93 $\pm$ 0.03 Bc
	细根 Fine root	27.22 $\pm$ 0.65 Ad	1.09 $\pm$ 0.03 Db	9.65 $\pm$ 0.04 Dd
9	叶 Leaves	37.48 $\pm$ 0.94 Ae	1.91 $\pm$ 0.18 ABc	20.26 $\pm$ 0.44 Af
	枝 Branches	22.64 $\pm$ 1.18 Ab	1.11 $\pm$ 0.03 Aab	8.41 $\pm$ 0.06 BCc
	皮 Stem bark	29.80 $\pm$ 1.35 Ad	1.30 $\pm$ 0.11 Ab	10.09 $\pm$ 0.23 Ae
	干 Stem wood	14.28 $\pm$ 0.38 Aa	0.99 $\pm$ 0.16 Aa	4.50 $\pm$ 0.27 Aa
	粗根 Coarse root	22.35 $\pm$ 0.64 Ab	1.11 $\pm$ 0.09 Aab	7.28 $\pm$ 0.09 Bb
	中根 Medium root	26.25 $\pm$ 0.79 Bc	1.10 $\pm$ 0.04 Bab	8.87 $\pm$ 0.03 Bcd
	细根 Fine root	28.87 $\pm$ 0.51 Bd	1.02 $\pm$ 0.02 Ca	9.49 $\pm$ 0.05 CDde
11	叶 Leaves	38.48 $\pm$ 1.72 Ae	2.25 $\pm$ 0.16 Cd	19.65 $\pm$ 0.43 Ae
	枝 Branches	24.97 $\pm$ 0.46 Ab	1.38 $\pm$ 0.09 Bc	7.90 $\pm$ 0.13 Ac
	皮 Stem bark	29.86 $\pm$ 2.23 Ad	1.29 $\pm$ 0.06 Ac	9.70 $\pm$ 0.08 Ad
	干 Stem wood	13.54 $\pm$ 1.43 Aa	0.90 $\pm$ 0.08 Aa	3.61 $\pm$ 0.56 Aa
	粗根 Coarse root	23.95 $\pm$ 0.23 BCb	1.10 $\pm$ 0.01 Ab	6.96 $\pm$ 0.02 Ab
	中根 Medium root	27.58 $\pm$ 0.31 Cc	0.95 $\pm$ 0.07 Aa	8.99 $\pm$ 0.06 Bd
	细根 Fine root	31.40 $\pm$ 0.52 Cd	0.92 $\pm$ 0.03 Ba	9.06 $\pm$ 0.10 Bd
17	叶 Leaves	39.59 $\pm$ 1.56 Ae	2.19 $\pm$ 0.07 BCe	19.22 $\pm$ 0.61 Ae
	枝 Branches	25.14 $\pm$ 1.51 Ab	1.35 $\pm$ 0.09 Bd	8.23 $\pm$ 0.06 BCc
	皮 Stem bark	30.05 $\pm$ 1.68 Ac	1.37 $\pm$ 0.11 Ad	9.91 $\pm$ 0.32 Ad
	干 Stem wood	13.96 $\pm$ 1.30 Aa	0.91 $\pm$ 0.11 Aa	4.23 $\pm$ 0.26 Aa
	粗根 Coarse root	24.39 $\pm$ 0.82 Cb	1.15 $\pm$ 0.04 Ac	7.36 $\pm$ 0.03 BCb
	中根 Medium root	29.04 $\pm$ 0.24 Dc	1.14 $\pm$ 0.01 Bbc	8.47 $\pm$ 0.05 Ac
	细根 Fine root	32.99 $\pm$ 1.08 Dd	1.01 $\pm$ 0.04 Cab	9.39 $\pm$ 0.07 Cd
31	叶 Leaves	38.06 $\pm$ 0.80 Ae	2.16 $\pm$ 0.15 BCe	21.28 $\pm$ 1.06 Ad
	枝 Branches	25.36 $\pm$ 1.09 Ab	1.27 $\pm$ 0.09 Bc	7.72 $\pm$ 0.07 Ab
	皮 Stem bark	31.44 $\pm$ 0.81 Ac	1.40 $\pm$ 0.08 Ad	9.36 $\pm$ 0.15 Ac
	干 Stem wood	13.03 $\pm$ 1.56 Aa	0.93 $\pm$ 0.03 Aa	3.48 $\pm$ 0.77 Aa
	粗根 Coarse root	25.33 $\pm$ 1.30 Cb	1.11 $\pm$ 0.01 Ab	7.61 $\pm$ 0.10 Db
	中根 Medium root	30.21 $\pm$ 0.58 Ec	1.12 $\pm$ 0.02 Bb	8.63 $\pm$ 0.10 Abc
	细根 Fine root	33.43 $\pm$ 0.65 Dd	0.86 $\pm$ 0.04 Aa	8.72 $\pm$ 0.06 Abc

注: 不同大写字母表示同一组分不同林龄之间的养分含量差异显著, 不同小写字母表示同一林龄不同组分之间的养分含量差异显著 ( $p < 0.05$ )

Notes: Values followed by different uppercase letters indicate a significant difference among the stand ages; different lowercase letters indicate a significant difference among the components according to Duncan's multiple range test ( $p < 0.05$ )



注: L: 叶; B: 枝; SB: 皮; SW: 干; CR: 粗根; MR: 中根; FR: 细根

Notes: L: Leaves; B: Branches; SB: Stem bark; SW: Stem wood; CR: Coarse root; MR: Medium root; FR: Fine root

图 1 各组分养分含量随林龄增加的 RDA 排序图

Fig. 1 Ordination diagram of RDA on the nutrient concentrations of different components with stand age

0.05)。枯落物 N 含量为 20.57~22.72 g·kg<sup>-1</sup>, 其中, 31 年生人工灌木林显著高于其他林龄; P 含量为 1.01~1.20 g·kg<sup>-1</sup>, K 含量为 13.41~15.80 g·kg<sup>-1</sup>。枯落物 N 积累量为 22.53~46.56 kg·hm<sup>-2</sup>, P 积累量为 1.25~2.46 kg·hm<sup>-2</sup>, K 积累量为 16.79~27.48 kg·hm<sup>-2</sup>, 3 种养分元素积累量随着林龄的增加显著增加 ( $p < 0.05$ ) (表 5)。

### 2.4 养分生物循环特征

从表 6 可以看出: 3 种养分元素的贮存量和归

还量随着林龄增加而增加, 并表现出 N > K > P 的趋势。N 元素的利用系数为 0.08~0.32, 循环系数为 0.37~0.60, 周转期为 8.54~19.89 a; P 元素的利用系数为 0.09~0.33, 循环系数为 0.39~0.63, 周转期为 7.67~17.41 a; K 元素的利用系数为 0.13~0.40, 循环系数为 0.58~0.74, 周转期为在 4.32~10.75 a。3 种养分元素的利用系数随着林龄增加而降低, 循环系数和周转期随着林龄增加而增加。各林龄中间锦鸡儿 K 元素的利用系数和循环系数明显大于 N 元素和 P 元素, 周转期明显小于 N 元素和 P 元素。

## 3 讨论

### 3.1 各组分养分含量特征

叶是植物代谢活动最旺盛的同化器官, 是进行光合作用、合成有机物的重要场所, 需要更多的养分来维持其生理功能<sup>[6]</sup>。干是养分和水分的运输通道, 生理生化活动较弱, 养分被消耗和转移的较多, 导致其养分含量远低于叶<sup>[6]</sup>。在本研究中, 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林各组分中, 叶的养分含量最高, 干的养分含量最少, 这与其他学者对沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* Linn.)、白榆 (*Ulmus pumila* L.) 和新疆杨 (*Populus alba*

表 3 各组分 N 含量与 P、K 含量的相关性

Table 3 Correlation analysis between N concentrations and P, K concentrations of different components

	叶N Leaves N	枝N Branches N	皮N Stem bark N	干N Stem wood N	粗根N Coarse root N	中根N Medium root N	细根N Fine root N
叶P Leaves P	0.442	0.301	-0.486	0.043	<b>0.651**</b>	<b>0.756**</b>	<b>0.680**</b>
枝P Branches P	0.350	<b>0.691**</b>	0.094	0.008	0.177	0.033	0.119
皮P Stem bark P	0.134	0.291	<b>0.515*</b>	<b>-0.544*</b>	-0.013	-0.043	0.029
干P Stem wood P	0.271	-0.240	-0.266	0.184	0.062	-0.028	-0.078
粗根P Coarse root P	-0.058	0.397	0.166	-0.186	-0.247	-0.312	-0.201
中根P Medium root P	0.022	-0.026	0.425	0.173	-0.014	-0.063	-0.202
细根P Fine root P	-0.079	-0.181	0.203	0.109	<b>-0.724**</b>	<b>-0.761**</b>	<b>-0.664**</b>
叶K Leaves K	0.058	-0.160	-0.018	-0.139	0.433	0.397	0.236
枝K Branches K	-0.062	-0.440	-0.032	0.004	<b>-0.620*</b>	<b>-0.767**</b>	<b>-0.806**</b>
皮K Stem bark K	-0.375	-0.211	-0.278	-0.111	-0.424	<b>-0.580*</b>	-0.502
干K Stem wood K	-0.112	-0.192	-0.136	0.385	-0.217	-0.354	-0.381
粗根K Coarse root K	0.019	-0.062	0.392	-0.118	-0.268	0.166	-0.097
中根K Medium root K	-0.254	-0.281	0.048	-0.010	-0.429	<b>-0.653**</b>	<b>-0.637**</b>
细根K Fine root K	-0.246	-0.378	0.139	0.140	<b>-0.715**</b>	<b>-0.759**</b>	<b>-0.729**</b>

注: \*代表显著水平  $p < 0.05$ ; \*\*代表显著水平  $p < 0.01$

Notes: \*. Correlation is significant at the 0.05 level; \*\*Correlation is significant at the 0.01 level

表 4 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林养分积累量

Table 4 Nutrient accumulation of *C. intermedia* plantations of different stand age

(kg·hm<sup>-2</sup>)

养分 Nutrients	林龄 Age/a	叶 Leaves	枝 Branches	皮 Stem bark	干 Stem wood	粗根 Coarse root	中根 Medium root	细根 Fine root	合计 Total
N	6	40.22	34.46	4.19	3.09	75.45	23.54	11.43	192.38
	9	46.48	54.87	5.66	5.81	94.41	27.03	14.72	248.98
	11	50.15	80.65	7.37	6.86	148.51	32.08	18.11	343.73
	17	55.69	100.99	7.81	7.16	314.91	52.66	29.47	568.70
	31	74.35	288.73	29.76	23.07	399.99	77.75	32.54	926.19
P	6	1.86	1.93	0.19	0.22	3.91	1.10	0.46	9.66
	9	2.37	2.69	0.25	0.40	4.67	1.14	0.52	12.04
	11	2.93	4.47	0.32	0.46	6.80	1.10	0.53	16.60
	17	3.08	5.42	0.36	0.47	14.89	2.06	0.90	27.18
	31	4.22	14.42	1.32	1.65	17.53	2.87	0.84	42.86
K	6	20.48	12.10	1.32	1.03	25.09	8.39	4.05	72.48
	9	25.12	20.39	1.92	1.83	30.75	9.14	4.84	93.98
	11	25.61	25.51	2.39	1.83	43.13	10.46	5.22	114.15
	17	27.04	33.07	2.58	2.17	95.00	15.35	8.39	183.60
	31	41.57	87.91	8.86	6.17	120.24	22.20	8.49	295.43

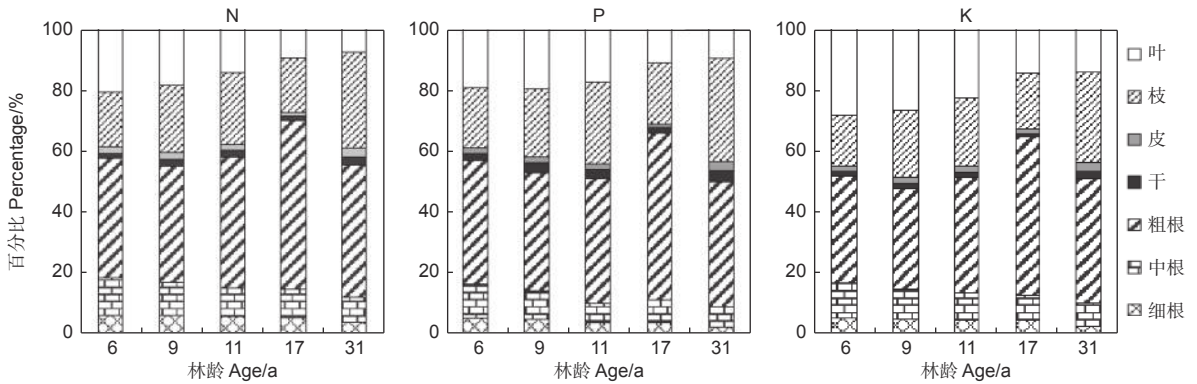


图 2 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林各组分养分积累量的分配

Fig. 2 Distribution of nutrients accumulation in different components of *C. intermedia* plantations of different stand age

表 5 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林枯落物量、养分含量及养分积累量 (平均值 ± 标准差, n=3)

Table 5 Litter accumulation, nutrient concentration and accumulation of *C. intermedia* plantations of different stand age (means ± SD, n=3)

林龄 Age/a	枯落物量 Litter accumulation/(t·hm <sup>-2</sup> )	养分含量 Nutrient concentration/(g·kg <sup>-1</sup> )			养分积累量 Nutrients accumulation/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
		N	P	K	N	P	K
6	1.06 ± 0.10 a	21.22 ± 0.42 a	1.18 ± 0.04 c	15.80 ± 0.24 e	22.53 ± 1.91 a	1.26 ± 1.26 a	16.79 ± 1.67 a
9	1.24 ± 0.06 b	21.13 ± 0.56 a	1.01 ± 0.03 a	15.36 ± 0.20 d	26.18 ± 1.66 b	1.25 ± 1.25 a	19.04 ± 0.88 b
11	1.34 ± 0.02 b	21.14 ± 0.19 a	1.01 ± 0.01 a	14.13 ± 0.17 b	28.32 ± 0.51 bc	1.35 ± 1.35 a	18.93 ± 0.20 b
17	1.48 ± 0.04 c	20.57 ± 0.10 a	1.08 ± 0.01 b	15.01 ± 0.04 c	30.41 ± 0.77 c	1.59 ± 1.59 b	22.20 ± 0.68 c
31	2.05 ± 0.05 d	22.72 ± 0.19 b	1.20 ± 0.02 c	13.41 ± 0.09 a	46.56 ± 0.77 d	2.46 ± 2.46 c	27.48 ± 0.53 d

注: 不同小写字母表示同一林龄不同组分之间的养分含量差异显著 (p < 0.05)

Notes: Values followed by different lowercase letters indicate a significant difference among the components according to Duncan's multiple range test (p < 0.05)

表 6 不同林龄中间锦鸡儿人工灌木林养分生物循环特征

Table 6 Cycling characteristics of nutrients in *C. intermedia* plantations of different stand age

养分 Nutrients	项目 Titem	林龄 Age/a				
		6	9	11	17	31
N	贮存量 Storage/(kg·hm <sup>-2</sup> )	192.38	248.98	343.73	568.70	926.19
	存留量 Retention/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	38.48	31.12	34.37	35.54	30.87
	归还量 Return/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	22.53	26.18	28.32	30.41	46.56
	吸收量 Absorption/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	61.01	57.31	62.69	65.95	77.43
	利用系数 Utilization coefficient	0.32	0.23	0.18	0.12	0.08
	循环系数 Cycling coefficient	0.37	0.46	0.45	0.46	0.60
	周转期 Recycling period/a	8.54	9.51	12.14	18.70	19.89
P	贮存量 Storage/(kg·hm <sup>-2</sup> )	9.66	12.04	16.60	27.18	42.86
	存留量 Retention/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	1.93	1.51	1.66	1.70	1.43
	归还量 Return/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	1.26	1.25	1.35	1.59	2.46
	吸收量 Absorption/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	3.19	2.75	3.01	3.29	3.89
	利用系数 Utilization coefficient	0.33	0.23	0.18	0.12	0.09
	循环系数 Cycling coefficient	0.39	0.45	0.45	0.48	0.63
	周转期 Recycling period/a	7.67	9.65	12.28	17.09	17.41
K	贮存量 Storage/(kg·hm <sup>-2</sup> )	72.48	93.98	114.15	183.60	295.43
	存留量 Retention/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	12.08	10.44	10.38	10.80	9.53
	归还量 Return/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	16.79	19.04	18.93	22.20	27.48
	吸收量 Absorption/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	28.87	29.48	29.31	33.00	37.01
	利用系数 Utilization coefficient	0.40	0.31	0.26	0.18	0.13
	循环系数 Cycling coefficient	0.58	0.65	0.65	0.67	0.74
	周转期 Recycling period/a	4.32	4.94	6.03	8.27	10.75

Linn. Var. *pyramdalis* Bunge) 等农田防护林各组分养分分布特征的研究结果一致<sup>[20]</sup>, 这说明在干旱贫瘠的沙地生态系统中, 植物在有限的养分供应条件下维持较高的叶片养分含量, 进而完成其正常的生活史<sup>[21]</sup>。

### 3.2 养分元素变化特征

本研究中, 各径级根系的 N 含量随着林龄的增加显著增加, 细根的 P、K 含量以及枝和中根的 K 含量显著降低。中间锦鸡儿为豆科灌木, 根部大量的根瘤菌具有高固氮活性, 可以固定空气中的游离态氮<sup>[22]</sup>, 而豆科植物形成或维持共生系统需要消耗大量的 P, 根瘤菌固氮酶在固氮过程中也需要大量的 P<sup>[23]</sup>, K 也参与了调节寄主细胞膜渗透及一系列同化过程, 促进植物生长, 提高光合效率, 保证豆科植物的结瘤和固氮酶活性<sup>[24]</sup>。本研究对各组分 N 含量和 P、K 含量进行了相关分析和 RDA 分

析, 结果也表明各径级根系 N 含量与细根的 P 和 K 含量及枝和中根的 K 含量呈显著负相关。这说明中间锦鸡儿根系的固氮过程会消耗自身的 K 和 P, 且主要消耗细根的 K 和 P、其次是枝和中根的 K。有学者对晋西北小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla* Lam.) 灌丛营养特征的研究也得出相似的结果, 即根系的 N 含量随着林龄的增加显著增加, 而 P 和 K 含量随着林龄的增加显著降低<sup>[25]</sup>。Inagaki 等<sup>[26]</sup>的研究也表明, 豆科植物比非豆科植物需要更多的 P, 给金合欢 (*Acacia mangium* Willd.) 人工林施用 P 肥后, 细根产量和根瘤都增加了。

再吸收是植物用来保存养分的一种策略。在本研究中, 枯落物的主要成分是叶, 但枯落物的养分含量明显低于叶的养分含量, 这是因为衰老组织的养分元素向存活组织运输迁移导致的<sup>[8]</sup>。说明中间锦鸡儿具有养分元素转移和再吸收的机能, 在贫瘠

脆弱的沙化生态系统中具有很好的适应性和养分元素利用的竞争策略,降低了对环境供给养分的依赖。有学者对山西太岳山不同林龄华北落叶松 (*Larix principis-ruppechtii* Mayr.) 人工林的研究也得到相似的结果,人工林凋落物 C、N、P、K 4 种养分元素含量低于叶<sup>[27]</sup>。Peri 等<sup>[28]</sup>对 *Nothofagus antarctica* (G.Forster) Oersted 的研究结果也表明,衰老前叶片的养分吸收可达到生长期最大浓度的 50%。

### 3.3 养分的积累与分配

本研究 6 年生中间锦鸡儿生物量和养分积累量均高于黄土高原地区相似林龄 (5 年生) 柠条人工林<sup>[29]</sup>,并且随着林龄的增长,各组分养分积累量与生物量均呈现增加的趋势。中间锦鸡儿人工灌木林各组分中,粗根的生物量及养分积累量最高,干和皮的生物量及养分积累量较低,地下组分的养分积累量高于地上组分 (9 年生 K 除外)。根系养分积累量占总养分积累量的百分比随林龄的增加先增加后降低,在 17 年生人工林达到峰值,N、P 和 K 积累量百分比分别为 70%、66% 和 63%,说明这个阶段是中间锦鸡儿人工灌木林根系快速发展阶段。其他学者对柠条锦鸡儿人工林生长过程中生物量积累的研究也表明,在成熟林和过熟林中,根系生物量占总生物量的比值较高,达到 58.7%<sup>[5]</sup>。

### 3.4 养分循环特征

养分利用系数的大小反应植物对该养分贮存能力的大小<sup>[30]</sup>。本研究中,3 种养分元素的利用系数随着林龄的增加而降低,这说明随着林龄的增加,中间锦鸡儿对养分的需求变小,贮存能力也有所降低。有学者对不同林龄马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 人工林的研究发现,随着林龄的增加,马尾松自身养分利用效率降低<sup>[8]</sup>。还有学者对黄土高原不同乔灌树种人工纯林生态系统的养分循环研究表明,林龄较大的旱柳 (*Salix matsudana* Koidz.) 对养分的需求较小,贮存能力小<sup>[29]</sup>。中间锦鸡儿人工灌木林 3 种养分的循环系数随着林龄的增加而增加,31 年生人工林的养分循环系数最高,具有低存留、高归还的特点。各林龄中间锦鸡儿 K 元素的利用系数和循环系数明显大于 N 元素和 P 元素,周转期明显小于 N 元素和 P 元素,说明 K 元素的循环速率较快,在系统中存留量的比例小,流动性大。有些学者对黄土高原不同乔灌树种人工纯林的研究发现,白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、刺槐和油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 林 K 元

素的利用系数和循环系数高于 N 和 P<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

高寒沙地中间锦鸡儿人工灌木林随着林龄的增加,(1)各径级根系 N 含量和叶片 P 含量显著增加,细根的 P、K 含量以及枝和中根的 K 含量显著降低;(2)根系养分积累量大于地上组分,其占总养分积累量的百分比先增加后降低,在 17 年生达到峰值;(3)3 种养分元素的利用系数降低,循环系数和周转期增加,K 元素的利用系数和循环系数明显大于 N 元素和 P 元素,周转期明显小于 N 元素和 P 元素。综上所述,高寒沙地中间锦鸡儿人工灌木林在生长过程中将更多的养分分配给根系来适应严酷的自然环境,其固氮过程会消耗自身的 K 和 P,其中,K 元素的循环速率较快,流动性大。因此,建议对中间锦鸡儿人工灌木林的管护过程中适当添加 K 肥和 P 肥。

### 参考文献:

- [1] 田大伦,项文化,康文星. 马尾松人工林微量元素生物循环的研究[J]. 林业科学, 2003, 39 (4): 1-8.
- [2] MCDONALD M A, HEALEY J R. Nutrient cycling in secondary forests in the Blue Mountains of Jamaica[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 139(1-3): 257-278.
- [3] 程远峰, 国庆喜, 李晓娜. 东北天然次生林下木树种的生物量器官分配规律[J]. 生态学杂志, 2010, 29 (11): 2146-2154.
- [4] OSONE Y, TATENO M. Applicability and limitations of optimal biomass allocation models: a test of two species from fertile and infertile habitats[J]. Annals of Botany, 2005, 95(7): 1211-1220.
- [5] DENG L, HAN Q, ZHANG C, et al. Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana korshinskii* Kom plantation development[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 906-917.
- [6] 王新英, 史军辉, 刘茂秀. 塔里木河流域不同林龄天然胡杨林生物量及养分积累特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33 (3): 45-51.
- [7] NIKLAS K J, ENQUIST B J. On the vegetative biomass partitioning of seed plant leaves, stems, and roots[J]. The American Naturalist, 2002, 159(5): 482-497.
- [8] 项文化, 田大伦. 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26 (1): 89-95.
- [9] XIE Y H, AN S Q, WU B F. Resource allocation in the submergded plant *Vallisneria spiralis* related to sediment type, rather



- than water-column nutrients[J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(3): 391-402.
- [10] CRAINE J M. Competition for nutrients and optimal root allocation[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285(1/2): 171-185.
- [11] 罗永开,方精云,胡会峰. 山西芦芽山14种常见灌木生物量模型及生物量分配[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 115-125.
- [12] 曾伟生,白锦贤,宋连城,等. 内蒙古柠条和山杏单株生物量模型研建[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(3): 311-316.
- [13] 张新军,高玉葆. 中间锦鸡儿的生长及生态化学计量学特征与基质稳定性关系初探[J]. *植物研究*, 2011, 31(2): 180-187.
- [14] 王凯,雷虹,王宗琰,等. 干旱胁迫下小叶锦鸡儿幼苗C、N、P分配规律及化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 47-56.
- [15] JIA Z Q, ZHU Y J, LIU L Y. Different water use strategies of juvenile and adult *Caragana intermedia* plantations in the Gonghe Basin, Tibet Plateau[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(9): e45902.
- [16] 杨凯悦,贾志清,张立恒,等. 高寒沙区典型人工林土壤水分空间分布特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 88-94.
- [17] LI Q X, JIA Z Q, LIU T, *et al.* Effects of different plantation types on soil properties after vegetation restoration in an alpine sandy land on the Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(2): 200-209.
- [18] 戴捷,贾志清,李清雪,等. 自然降雨对高寒沙地中间锦鸡儿人工林土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(4): 151-159.
- [19] 刘丽颖,贾志清,朱雅娟,等. 共和盆地中间锦鸡儿人工林根系的分布特征[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1626-1631.
- [20] 桑巴叶,朱玉伟,陈启民,等. 准噶尔盆地主要农田防护林的生物量及养分分布特征[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 147-152.
- [21] CHAPIN F S III. The mineral nutrition of wild plants[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11: 233-260.
- [22] 高丽锋,邓馨,王洪新,等. 毛乌素沙地中间锦鸡儿根瘤菌的多样性及其抗逆性[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 44-48.
- [23] VITOUSEK P M, HATTENSCHWILER S, OLANDER L, *et al.* Nitrogen and nature[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 97-101.
- [24] HU Y C, SCHMIDHALTER U. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants[J]. *Journal of plant nutrition and soil science*, 2005, 168(4): 541-549.
- [25] 张强. 晋西北小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)人工灌丛营养特征与土壤肥力状况研究[D]. 太原: 山西大学, 2011.
- [26] INAGAKI M, INAGAKI Y, KAMO K, *et al.* Fine root production in response to nutrient application at three forest plantations in Sabah, Malaysia: higher nitrogen and phosphorus demand by *Acacia mangium*[J]. *Journal of Forest Research*, 2009, 14(3): 178-182.
- [27] 纪文婧. 山西太岳山不同林龄华北落叶松人工林养分特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [28] PERI P L, VERONICA G, GUILLERMO M P. Above- and belowground nutrients storage and biomass accumulation in marginal *Nothofagus antarctica* forests in Southern Patagonia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2502-2511.
- [29] 陈凯. 土高原不同乔灌树种人工纯林生态系统的养分循环研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 19-26.
- [30] 张希彪,上官周平. 土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 141-151.

# The Allocation and Cycling Characteristics of Main Nutrients for *Caragana intermedia* With Different Stand Age on Alpine Sandy Land

LI Qing-xue<sup>1,2</sup>, JIA Zhi-qing<sup>1,2,3</sup>, HE Ling-xian-zhi<sup>1,2</sup>, ZHAO Xue-bin<sup>2</sup>, Yang Xiu-ben<sup>2</sup>

(1. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Qinghai Gonghe 813005, Qinghai, China; ; 3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] Understanding the allocation and cycling characteristics of the main nutrients in the process of artificial vegetation restoration on sandy land will help us fully understand the strategies of plant adaptation to the desert ecosystems, and provide theory for the vegetation management. [Method] This study was conducted in the shrub plantations of *Caragana intermedia* with different stand age of 6-, 9-, 11-, 17- and 31-year-old on alpine sandy land. The whole plant of average shrubs was completely harvested for analysing the main nutrients N, P and K concentration, accumulation, allocation and cycling characteristics. [Result] (1) In components, leaves and stem bark with the highest nutrient content, and stem wood with the lowest nutrient content. As the plantation age increased, N content in three root-diameter (coarse root: diameter > 5 mm, medium root: 2 mm < diameter ≤ 5 mm, fine root: diameter ≤ 2 mm) and P content in leaves increased significantly, whereas P and K contents in fine root, K contents in branches and medium root decreased significantly. The N contents of three root-diameters had a significant negative correlation with the P and K contents of fine root, and the N contents of medium and fine root had a significant negative correlation with the K contents of branches and medium root. (2) The nutrient accumulation of root was higher than aboveground components. The percentage of the nutrient accumulation of the root to the aboveground components firstly increased and then decreased as the plantation age increased. It peaked in 17-year-old plantation, and the percentage of N, P and K were 70%, 66% and 63%, respectively. (3) As the plantation age increased, the utilization coefficient of the nutrients decreased, while the recycling period and cycling coefficient increased. Utilization coefficient and cycling coefficient of K were higher and recycling period was shorter than N and P in all plantations. [Conclusion] With the development of *C. intermedia* plantation on alpine sandy land, more nutrients were allocated to the root system to adapt to the harsh environment. The nitrogen fixation process of *C. intermedia* will consume its own K and P, of which K with fast circulation rate and high mobility. Therefore, we suggested that K and P fertilizer should be added in the management and protection of *C. intermedia* shrub plantation.

**Keywords:** *Caragana intermedia* plantation; nutrients; allocation; cycling; alpine sandy land

(责任编辑: 张 研)