

不同植物恢复措施对采石矿废弃地土壤 物理性质的改良效果及评价

闫烨琛^{1,2,3}, 赵廷宁^{1,2,3}, 张 艳^{1,2,3}, 王美琪^{1,2,3}, 胡 平^{1,2,3}, 杨 凝^{1,2,3}, 陈 童^{1,2,3}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 3. 北京林业大学 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 为揭示不同植物恢复措施对采石矿废弃地土壤物理性质的改良效果, 选取白杨 *Populus tomentosa*, 侧柏 *Platycladus orientalis*, 油松 *Pinus tabulaeformis*, 黄栌 *Cotinus coggygia* 和油松+黄栌 5 种典型植物恢复措施, 采用方差分析和主成分分析法对采取措施后的土壤物理性质进行综合评价。结果表明: ①通过 5 种植物恢复措施对采石矿进行修复后的土壤粒径均主要分布在 0.25~10.00 mm; ②相比较于白杨、油松、黄栌、油松+黄栌 4 种恢复措施, 侧柏恢复措施下土壤容重降低了 2.51%~29.83%、土壤孔隙度增大了 7.49%~24.16%、土壤持水量升高了 3.74%~24.03%; ③5 种不同植物恢复措施治理后的表层土壤田间持水量比深层提高 1.36%~24.30%; ④运用主成分分析法对 5 种不同植物恢复措施下的土壤容重、田间持水率、土壤孔隙度等指标分析得出: 矿区土壤物理性质质量从高到低排序为侧柏、油松+黄栌、油松、黄栌、白杨, 其中侧柏、油松+黄栌、油松 3 种植物恢复措施最后综合得分无显著差异, 即在采石矿的生态恢复中优先依次推荐。图 4 表 3 参 20

关键词: 土壤学; 采石矿; 植物恢复; 土壤物理性质; 改良效果

中图分类号: S714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)06-1062-07

Improvements and evaluation of soil physical properties with different plant types in an abandoned quarry

YAN Yechen^{1,2,3}, ZHAO Tingning^{1,2,3}, ZHANG Yan^{1,2,3}, WANG Meiqi^{1,2,3}, HU Ping^{1,2,3},
YANG Ning^{1,2,3}, CHEN Tong^{1,2,3}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To reveal improvements from different plant restoration and treatment measures on soil physical properties of quarries, five typical plant types: *Populus tomentosa*, *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis*, *Cotinus coggygia*, and *Pinus tabulaeformis* + *Cotinus coggygia* were selected and evaluated comprehensively and for soil physical properties using ANOVA and principal component analysis on soil bulk density, field water holding capacity, and soil porosity. Results showed that (1) After ecological restoration of the quarry, soil particle size for the five plant recovery types was mainly distributed in the range of 0.25–10.00 mm. (2) Soil bulk density and porosity presented significant difference, except *Pinus tabulaeformis*, under the ANOVA ($P=0.05$). Compared to the *Platycladus orientalis* recovery type, soil bulk density of the other four restoration types decreased 2.51%–29.83%, soil porosity increased 7.49%–24.16%, and water holding capacity increased 3.74%

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-02-26

基金项目: 北京市规划和国土资源管理委员会委托科技项目(2018HXFWSBXY017)

作者简介: 闫烨琛, 从事工程绿化研究。E-mail: 1432228278@qq.com。通信作者: 张艳, 讲师, 博士, 从事水土保持工程研究。E-mail: bltjzhangyan@163.com

-24.03%。(3) After treatment by the five different plant restoration types, water holding capacity of the 0–20 cm soil layer was 1.36%–24.30% higher than the 20–40 cm layer. (4) The principal component analysis for soil bulk density, field water holding capacity, and soil porosity showed that soil physical properties in the mining area were *Platycladus orientalis* > *Pinus tabulaeformis* + *C. coggygria* > *Pinus tabulaeformis* > *C. coggygria* > *Populus tomentosa*. The final comprehensive scores of *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis* + *C. coggygria*, and *Pinus tabulaeformis* were approximately the same so these three patterns should be recommended preferentially for ecological quarry restoration. [Ch, 4 fig. 3 tab. 20 ref.]

Key words: soil science; rock quarry; plant recovery; soil physical property; improvement effect

随着社会经济的发展和工业化程度的提高,人们对砂石料需求迅猛增长,采石场数量也呈激增之势,露天采石场的特点是规模小、数量多、距城市近、对环境影响的范围大。众多采石场正面临着十分严重的生态环境退化问题,如环境恶化、水土流失、生物多样性锐减等^[1];而且在开山采石的过程中造成山体破碎,岩石裸露,边坡稳定失衡,容易产生滑坡、泥石流等地质灾害,对周边居民正常生活产生严重威胁,对社会经济健康持续发展产生不良影响^[2]。面对这一状况,急需对矿山废弃地进行治理改良。中国近年来高度重视生态文明建设,倡导绿色发展,对废弃采石场的生态重建越来越重视^[3]。国内外对于废弃矿山的生态恢复研究主要集中在恢复策略^[4]、工程措施^[5]、恢复演替^[6]、土壤改良^[7]、绿化基质^[8]等方面,但针对采石场这种特殊的矿种类型相关恢复治理措施对土壤物理性质改良效果研究很少,并且少有提出针对采石矿生态重建的高效、适宜措施,针对不同植物措施恢复治理对土壤物理环境变化研究不够重视,因此不同植物措施对采石场土壤物理性质的改良效果需做进一步研究。本研究以北京市周边废弃采石场生态重建过程中不同植被恢复措施为研究对象,通过调查分析恢复治理中不同植物恢复措施对土壤物理性质的影响,探讨不同植物恢复措施与采石矿土壤物理性质改良之间的关系,旨在为采石矿这类特殊的矿区废弃地重构选择适宜的治理措施及对土壤物理性质快速改良提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

治理区位于北京市房山区河北镇境内,海拔约为200~380 m,属暖温带半湿润半干旱大陆季风气候区。春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷干燥。年平均气温10.8℃(山区),1月平均气温-4.6℃,7月平均气温24.3℃,年温差30.0℃左右。该地区春秋季节结霜频繁,年平均无霜期约160.0~180.0 d,冬季地面下最大冻土深度56 cm,年平均结冰天数124 d。多年平均降水量为650~700 mm。降水多集中在夏季(6~8月),占全年降水量的80%以上,且汛期多暴雨。采石场于2015年由国土资源部投资对其实施土地复垦工程,首先进行场地平整、压实,然后进行客土回填。客土来源于附近荒地,土壤物理性质基本一致,种植侧柏 *Platycladus orientalis*, 油松 *Pinus tabulaeformis*, 黄栌 *Cotinus coggygria* 和白杨 *Populus tomentosa* 等;研究区常见的草本植物有猪毛蒿 *Artemisia scoparia*, 狗尾草 *Setaria viridis*, 艾草 *Artemisia argyi*, 马唐 *Digitaria sanguinalis*, 青蒿 *Artemisia apiacea*, 地黄 *Rehmannia glutinosa*, 曼陀罗 *Datura stramonium*, 黄花蒿 *Artemisia annua*, 灰菜 *Chenopodium album* 等14种植物,其中猪毛蒿、狗尾草、马唐、青蒿、黄花蒿是调查样地各群落的优势种。

1.2 研究方法

1.2.1 试验地选定 试验于2018年7~8月在北京市房山区河北镇露天采石矿生态修复治理区进行实地调查取样,治理区的坡度为0°。调查前根据设计资料及现场踏查,最终选取5种植物(白杨、侧柏、油松、黄栌、油松+黄栌)修复措施(表1),种植每种植物时每穴施加客土。每种措施设置20 m × 20 m的标准样地。(1)采样方法。对标准地内的乔木进行每木检尺测量,测量树高、胸径、冠幅、郁闭度;在20 m × 20 m的标准样地内设置5个1 m × 1 m的草本样方,草本植物调查其种类、数量、平均高和盖度等基本情况;在样地内标准木的树穴内,用100 cm³体积的环刀取得原状土,按0~20和20~40 cm分层进行取样,每层重复3个,并用塑封袋分层采取一定的土样,自然风干。(2)草本植物相关指标计算方法。①丰富度指数^[9]: Margalef 指数 R 的计算公式为 $R = (S - 1) / \ln N$ 。其中: S 为群落中的总种数; N 为

群落中的个体总数。②多样性指数^[10]: Simpson 指数 D 的计算

公式为 $D=1-\sum_{i=1}^s P_i^2$ 。Shannon-Wiener 指数 H 的计算公式为

$H=-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ 。其中: P_i 为第 i 种个体数占群落中所有种个体数

的比例; S 为群落中总种数。③均匀度指数^[10]: Pielou 均匀度指数 J 的计算公式为 $J=H/H_{\max}=H/\ln S$ 。其中: H 为实际观察的种

类多样性, $H_{\max}$ 为最大的种类多样性; S 为群落中的总种数。
(3)土壤物理性质测定指标与方法。采用环刀法测定土壤容重及土壤水分物理性质(土壤含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、土壤孔隙度等)^[11];用筛分法测土壤粒径,将自然风干后的土壤研碎,分别过 10.00, 2.00, 1.00 和 0.25 mm 筛孔,每层进行称量,计算土壤粒径分布占比。

1.2.2 数据处理与评价方法 (1)采用 Excel 2016 和 Origin 2018 进行数据处理及图表绘制,使用 SPSS 18.0 统计软件进行单因素方差分析和主成分分析。(2)土壤物理性质主要采用土壤含水量、土壤容重、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙、非毛管孔隙 7 个指标作为评价指标。采用主成分分析法建立土壤物理性质的综合得分评价体系。计算出主成分得分后,再通过综合得分表达式得出综合得分。将综合得分按照高低进行排序,通过综合排序结果衡量其土壤理化性质情况。

2 结果与分析

2.1 草本植物物种多样性分析

如表 2 所示:侧柏和油松+黄栌措施对应草本层的 D , H 和 J 的差异不显著,表明这 2 种措施修复下的草本层生物多样性相似,且这 2 种措施治理后林下草本生物多样性相对于其他 3 种措施的值较大,说明这 2 种措施治理后草本恢复效果更好。白杨措施修复下的草本层 R , D 和 H 相对于侧柏、黄栌和油松+黄栌措施显著偏小($P<0.05$),说明白杨措施修复治理后的林下草本植被单一,群落稳定性较差。

表 2 不同植物配置下草本植物多样性比较

Table 2 Comparison of herbaceous plant diversity under different plant configurations of the quarry

措施类型	R	D	H	J
白杨	0.38 ± 0.06 d	0.58 ± 0.01 d	0.96 ± 0.02 d	0.87 ± 0.02 a
侧柏	1.03 ± 0.02 b	0.75 ± 0.02 b	1.49 ± 0.03 a	0.83 ± 0.07 a
油松	0.40 ± 0.02 d	0.63 ± 0.02 c	1.04 ± 0.03 c	0.94 ± 0.02 a
黄栌	1.08 ± 0.01 ab	0.59 ± 0.02 d	1.25 ± 0.05 b	0.70 ± 0.02 b
油松+黄栌	0.82 ± 0.01 c	0.77 ± 0.02 ab	1.55 ± 0.03 a	0.87 ± 0.01 a

说明:不同小写字母表示不同植物恢复措施存在显著差异($P<0.05$)

2.2 土壤物理性质分析

2.2.1 不同植物恢复措施修复下的土壤粒径分布特征 如图 1 所示:在 0~40 cm 土层,分布在 2.00~10.00 mm 的土壤粒径占比显著大于在大于 10.00 和 1.00~2.00 mm($P<0.05$)的土壤粒径占比;修复后的土壤粒径主要分布在 0.25~10.00 mm。在 0~20 cm 土层,分布在 0.25~10.0 mm 的土壤粒径占比从高到低依次为侧柏、黄栌、白杨、油松+黄栌、油松;在 20~40 cm 土层,分布在 0.25~10.00 mm 土壤粒径占比从高到低依次为白杨、侧柏、油松、黄栌、油松+黄栌。可以看出,在 0~20 cm 土层,侧柏措施修复下的 0.25~10.00 mm 土壤粒径含量最高,占百分比为 89%,白杨措施在 20~40 cm 土层 0.25~10.00 mm 土壤粒径含量最高,占百分比为 80%;且在 0~20 cm 土层 0.25~10.00 mm 土壤粒径含量高于 20~40 cm。

2.2.2 不同植物恢复措施修复下的土壤容重特征 土壤容重可以判断土壤的松紧程度,疏松、有团粒结构的土壤容重小,反之,紧实板结的容重大^[12]。如图 2 所示:在 0~20 和 20~40 cm 土壤中,侧柏措施修复作用下的土壤容重都显著小于($P<0.05$)其他几种措施修复下的土壤容重;侧柏、黄栌、油松+黄栌措施在 0~20 cm 的土壤容重都大于 20~40 cm 的土壤容重。这主要是由于长期植被恢复过程中,主要通过浇灌措施来补充植被所需水分,致使地表土壤板结。在 20~40 cm 土层白杨、油松 2 种措施修复作用下

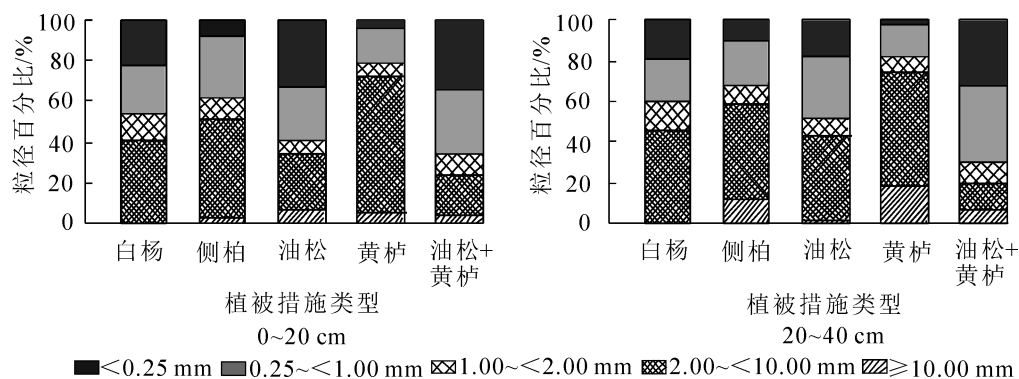


图 1 不同植物恢复措施治理后的土壤粒径分布

Figure 1 Distribution of soil particle size after different vegetation restoration measures

的土壤容重大于其他几种措施修复的土壤容重, 其值都大于 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 说明这 2 种措施修复下的土壤在 20~40 cm 深处土壤孔隙数量少, 土壤的水分、空气、热量状况较差。

2.2.3 不同植物恢复措施下的土壤孔隙度特征 如图 3 所示: 土壤孔隙度包括土壤毛管孔隙和土壤非毛管孔隙。土壤孔隙是储存土壤水分的场所, 也是土壤微生物等迁移的通道, 其大小取决于土壤质地、土壤结构等条件。不同治理措施的总孔隙度在土层深度 0~20 cm 内变化范围为 42.75%~52.10%; 在 20~40 cm 为 40.65%~53.60%。侧柏措施治理恢复的矿区土壤在 0~20 cm 及 20~40 cm 的土壤空隙度均大于其他几种措施, 说明侧柏措施治理恢复的土壤储存水分的能力更好, 能更好地为植被生长提供水分条件。同时可以看出: 5 种不同治理措施下在 0~20 cm 土层的土壤孔隙度从大到小依次为侧柏、油松、白杨、油松+黄栌、黄栌, 在 20~40 cm 土层土壤孔隙度从大到小依次为侧柏、油松、油松+黄栌、白杨、黄栌。

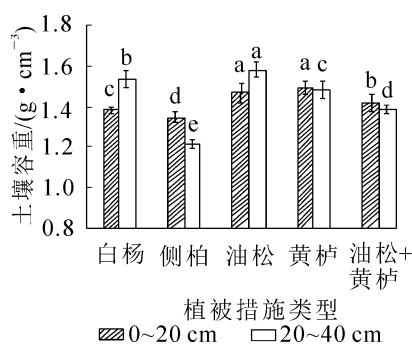


图 2 不同植物恢复措施治理后的土壤容重

Figure 2 Soil bulk densities after different vegetation restoration measures

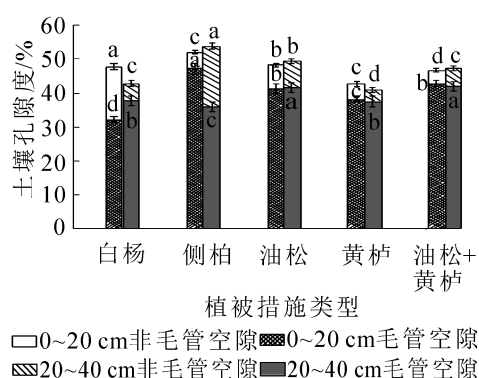


图 3 不同植物恢复措施治理后的土壤空隙度

Figure 3 Soil porosities after different vegetation restoration measures

2.2.4 不同植物恢复措施修复下的土壤田间持水量的特征 如图 4 所示: 5 种不同植物修复措施下, 土壤在 0~20 cm 土层的田间持水量均比 20~40 cm 土层的田间持水量高, 且 5 种不同治理措施下的土壤田间持水量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的大小规律呈现一致性, 从大到小依次为侧柏、黄栌、油松+黄栌、白杨、油松。说明矿区复垦地土壤保水、供水能力改良效果在浅层优于深层。土壤田间持水量的分布特征在不同措施间存在一定的差异, 侧柏治理措施恢复下的矿区各层土壤田间持水量都大于其他 4 种措施, 油松治理措施治理后的土壤田间持水量显著小于其他几种措施。

2.3 不同植物恢复措施的综合评价

运用主成分分析法, 针对采石场 5 种不同植物措施修复改良

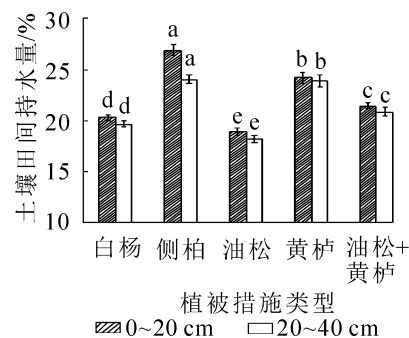


图 4 不同植物恢复措施治理后的土壤田间持水量

Figure 4 Soil field water-holding capacities after different vegetation restoration measures

土壤物理性质效果进行综合分析^[13]。根据特征值和相应的方差贡献率,将7个指标分为2个主成分,其中第1主成分以土壤含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙、非毛管孔隙为主的指标贡献较大,第2主成分中土壤容重的贡献较大。最终确定主成分得分和综合得分表达式如下: $F_1 = -0.47x_1 - 1.45x_2 + 0.92x_3 + 0.52x_4 + 0.47x_5 + 1.33x_6 - 0.897x_7$; $F_2 = 1.95x_1 + 0.11x_2 - 0.33x_3 - 0.31x_4 - 0.39x_5 + 0.28x_6 - 1.32x_7$ 。其中: F_1 为第1主成分; F_2 为第2主成分; x_1 为标准化的土壤含水量; x_2 为标准化土壤容重; x_3 为标准化饱和持水量; x_4 为标准化毛管持水量; x_5 为标准化田间持水量; x_6 为标准化毛管孔隙; x_7 为标准化非毛管孔隙。综合得分 $= 87.18 \times F_1 / 100 + 8.85 \times F_2 / 100$ 。

根据综合得分信息可知:侧柏、油松+黄栌、油松最后综合得分分别为11.29, 11.19和11.07,因此,施行不同治理措施后,土壤物理性质质量从高到低依次为侧柏、油松+黄栌、油松、黄栌、白杨(表3)。可以发现侧柏、油松+黄栌、油松这3种植物措施的最后得分相差不大,即在采石矿的生态恢复中优先依次推荐。

表3 主成分分析评价

Table 3 Evaluation of principal component analysis

措施类型	土壤深度/cm	主成分1	主成分2	综合得分	排名	总分	综合排名
白杨	0~20	5.94	-0.09	5.17	9	2.91	5
	20~40	-2.94	3.38	-2.26	10		
侧柏	0~20	6.86	-0.81	5.91	1	11.29	1
	20~40	6.26	-0.79	5.38	7		
油松	0~20	6.36	-0.70	5.48	5	11.07	3
	20~40	6.33	0.73	5.59	3		
黄栌	0~20	6.17	1.07	5.47	6	10.82	4
	20~40	5.94	1.92	5.35	8		
油松+黄栌	0~20	6.39	0.96	5.66	2	11.19	2
	20~40	6.27	0.72	5.53	4		

3 讨论

土壤物理性质是反映土壤潜在生产力的重要指标,它能影响土壤水分含量、热特性、通气性、土体稳定性等,进而影响作物的生长发育^[14]。土壤颗粒是土壤最基本的组成单元,土壤颗粒的粒径分布对土壤孔隙、土壤水分和土壤团聚体都有着巨大的影响^[15-16]。本研究结果表明:5种不同植被措施恢复下的土壤粒径主要分布在0.25~10.00 mm,土壤有机质是形成土壤颗粒的重要胶结物质,在土壤大粒径的形成过程中发挥着重要作用^[17]。由于表层土壤受植被的枯枝落叶和土壤微生物分解作用,使得表层土壤有机质高于深层土壤,因此出现表层土壤的大粒径含量高于深层。土壤容重是反映土壤紧密程度的一个重要指标,直接影响着土壤的孔隙状况^[18]。研究发现:白杨、油松2种植被措施恢复治理后的土壤容重在20~40 cm土层值都大于 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,这表明这2种植被措施对矿区恢复治理后的土壤容重普遍偏大,空隙度较小,储存土壤水分能力较弱,不利于植物根系生长,这与张志玲等^[19]的研究基本一致。这主要是因为白杨、油松2种措施对应的树种在幼林龄期以主根生长为主,侧根较少,对深层土壤的修复效果欠佳;侧柏、黄栌、油松+黄栌措施恢复治理后的表层土壤容重大于深层土壤容重,这主要是因为矿区植被的水分主要靠后期养护灌溉,由于灌溉水的瞬时量大,水压力大,对表层土壤造成严重扰动和结构重组,土壤发生板结、致密,这也就出现了本次研究出现的结果。本研究得出不同措施土壤田间持水量范围为18.18%~26.89%,5种治理措施在深层土壤中的田间持水量都低于表层。这一研究规律与陈晓燕等^[20]研究结果一致。由于深层土壤已经与该地原有的岩石风化物充分混合,其机械组成已经发生了变化,使其呈现出较低的田间持水量指标;另外,由于植物生长,其枯枝落叶对表层土壤的改良效果也优于深层,所以呈现出上层土壤的理化性质较好的趋势。利用主成分分析法可知:5种不同恢复措施治理后,土壤物理性质质量从高到低依次为侧柏、油松+黄栌、油松、黄栌、白杨。这与不同措施恢复治理后的

矿区土壤物理性质单因素分析结果一致, 也与 5 种不同植物措施恢复治理后的林下草本多样性指标调查分析结果相对应。

4 小结

不同植物恢复措施对采石矿生态修复后, 土壤粒径主要集中分布在 0.25~10.00 mm; 侧柏相对于其他 4 种植物恢复措施降低土壤容重, 增大土壤孔隙度, 提高土壤的持水能力更优; 5 种不同植物恢复措施恢复治理后的表层土壤田间持水量高于深层; 根据 5 种不同植被恢复措施下土壤土壤容重、田间持水量、土壤孔隙度等指标, 运用主成分分析法得出矿区土壤物理性质质量从高到低依次为侧柏、油松+黄栌、油松、黄栌、毛白杨。

5 参考文献

- [1] 方南平. 露天采石场生态环境恢复治理土地复垦探讨[J]. 福建地质, 2017, **36**(1): 61 – 68.
FANG Nanping. Discuss on restoration and rehabilitation of land reclamation of the open pit quarry ecological environment [J]. *Geol Fujian*, 2007, **36**(1): 61 – 68.
- [2] 杨振意, 薛立, 许建新. 采石场废弃地的生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2012, **32**(16): 5264 – 5274.
YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin. Advances in ecology restoration of abandoned quarries [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(16): 5264 – 5274.
- [3] 王锐, 秦娅青, 孙丹丹, 等. 露天采石场土地复垦适宜性评价及应用[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(3): 187 – 192.
WANG Rui, QIN Yaqing, SUN Dandan, *et al.* Evaluation and application of land reclamation suitability of open-pit quarry [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 1988, **38**(3): 187 – 192.
- [4] MEIRA-NETO J A A, CLEMENTE A, OLIVEIRA G, *et al.* Post-fire and post-quarry rehabilitation successions in Mediterranean-like ecosystems: implications for ecological restoration [J]. *Ecol Eng*, 2011, **37**(8): 1132 – 1139.
- [5] 金一鸣. 矿山废弃地工程绿化技术模式生态修复效益研究: 以黄院采石场为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
JIN Yiming. *Study on Ecological Restoration Benefit Evaluation of Engineering Revegetation Model in Mining Wasteland: Take Huangyuan Quarry as the Example* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [6] 袁剑刚, 周先叶, 陈彦, 等. 采石场悬崖生态系统自然演替初期土壤和植被特征[J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1517 – 1522.
YUAN Jiagang, ZHOU Xianye, CHEN Yan, *et al.* Natural vegetation and edaphic conditions on the cliff of abandoned quarries in early restoration [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(6): 1517 – 1522.
- [7] 刘斯文, 黄园英, 韩子金, 等. 离子型稀土矿山土壤生态修复研究与实践[J]. 环境工程, 2015, **33**(11): 160 – 165.
LIU Siwen, HUANG Yuanyin, HAN Zijin, *et al.* Practices of the soil ecological remediation in ion-absorbed rare earth mine [J]. *Environ Eng*, 2015, **33**(11): 160 – 165.
- [8] MAISTO G, de MARCOA, de NICOLA F, *et al.* Suitability of two types of organic wastes for the growth of sclerophyllous shrubs on limestone debris: amesocosm trial [J]. *Sci Total Environ*, 2009, **408**(7): 1508 – 1514.
- [9] 樊三龙, 方红, 高传部, 等. 北方草地牛粪中金龟子的多样性[J]. 生态学报, 2012, **32**(13): 4207–4214.
FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, *et al.* The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(13): 4207 – 4214.
- [10] 赵成章, 石福习, 董小刚, 等. 祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 115 – 122.
ZHAO Chengzhang, SHI Fuxi, DONG Xiaogang, *et al.* Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(1): 115 – 122.
- [11] 林大仪. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 120 – 150.
- [12] 李叶鑫, 吕刚, 刁立夫, 等. 露天煤矿排土场不同植被类型持水能力评价[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5): 309 – 314, 320.
LI Yexin, LÜ Gang, DIAO Lifu, *et al.* Evaluation of water retention capacity of different vegetation types in dump of

- opencast coal mine [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **31**(5): 309 – 314, 320.
- [13] 张子龙, 王文全, 缪作清, 等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1636 – 1644.
- ZHANG Zilong, WANG Wenquan, MIAO Zuoqing, *et al.* Application of principal component analysis in comprehensive assessment of soil quality under *Panax notoginseng* continuous plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(6): 1636 – 1644.
- [14] 付玲, 王彩云, 尹少华. 蘑菇渣基质生产狗牙根无土草皮配方施肥优化研究[J]. 草业学报, 2013, **22**(3): 241 – 249.
- FU Ling, WANG Caiyun, YIN Shaohua. Optimizing fertilisation for bermudagrass soilless sod using spent mushroom compost as the main substrate over plastic [J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2013, **22**(3): 241 – 249.
- [15] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子: 以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2015, **35**(14): 4625 – 4632.
- ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, LIU Yuanxin. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scale: a case study in the Loess Hilly-gully area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(14): 4625 – 4632.
- [16] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 等. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(6): 134 – 138.
- LÜ Shengqiao, GAO Peng, GENG Guangpo, *et al.* Characteristics of soil particles and their correlation with soil organic matter in lowlands of the Yellow River Delta [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, **25**(6): 134 – 138.
- [17] 王翠翠, 魏永霞, 王存国, 等. 不同水土保持措施及其组合对土壤团聚体及有机质的影响[J]. 中国农村水利水电, 2014(5): 11 – 14.
- WANG Cuicui, WEI Yongxia, WANG Cunguo, *et al.* The effect of different water conservation measures and their combinations on aggregate and organic matter of soil [J]. *China Rural Water Conserv Hydropower*, 2014(5): 11 – 14.
- [18] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(4): 611 – 620.
- LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, *et al.* Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. *Acta Pedol Sin*, 2010, **47**(4): 611 – 620.
- [19] 张志玲, 尹志刚, 谢伟, 等. 矿区排土场不同植物对根区土壤物理性质的改良效果与评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, **16**(3): 50 – 58.
- ZHANG Zhiling, YIN Zhigang, XIE Wei, *et al.* Improvement effects and evaluation of different plants on the physical properties of root region soil in a mine dump [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2008, **16**(3): 50 – 58.
- [20] 陈晓燕, 叶建春, 陆桂华, 等. 全国土壤田间持水量分布探讨[J]. 水利水电技术, 2004, **35**(9): 113 – 116, 119.
- CHEN Xiaoyan, YE Jianchun, LU Guihua, *et al.* Study on field capacity distribution about soil of China [J]. *Water Resour Hydropower Eng*, 2004, **35**(9): 113 – 116, 119.