金矿开采对内蒙西部草原水土保持的影响及保护措施

李仙波，郭学茹，左　锐，王　膑，刘　丽

（北京师范大学水科学研究院，地下水污染控制与修复教育部工程研究中心，北京　100875）

摘要：巴彦淖尔市乌拉特前旗是我国典型荒漠生态脆弱区，当地工矿企业开发加剧了区域水土流失。研究以当地某金矿开采活动为例，在分析水土流失现状的条件下，确定矿区水土流失成因和金矿开采对区域水土保持的影响及危害，并针对性地制定了水土保持工程措施和植被措施，包括边坡防护、截排水沟、挡水围堰、表土剥离及绿化区覆土整治等，实现了金矿开发的生态效益与经济效益的协调发展。

关键词：环境保护工程；水土保持；生态脆弱区；金矿开采

中图分类号：X37　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-2850(2015)24-2570-08

Gold mining influence on soil and water conservation in western Inner Mongolia grassland

LI Xianbo, GUO Xueru, ZUO Rui, WANG Bin, LIU Li

(*Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation*, *Ministry of Education*, *College of Water Sciences*, *Beijing Normal University*, *Beijing*　100875, *China*)

Abstract: Urad front banner in Bayannaoer city is a typical desert ecological fragile area with serious soil and water loss due to the mining activities. Based on a local gold mine as an example, under the background of soil and water loss, causes of soil and water loss in the mining area are analyzed. Meanwhile, the effects and harms of gold mining on regional soil and water conservation are determined. Then, this paper establishes reasonable and comprehensive soil and water conservation engineering measures and vegetation measures for achieving coordinated development of ecological benefits and economic benefits of gold mining.

Key words: environmental protection engineering; soil and water conservation; ecological fragile area; gold mining

0　引言

金矿资源开发利用对国家经济社会发展和国际地位提升有着重要的意义，也是人类获取矿产资源的基本手段，促进了人类社会的发展[1]。但人类的矿业开发活动也给自然环境和人类的自身安全造成了一系列的负面影响，如地面滑坡、泥石流等水土流失问题，地面塌陷、裂缝等地质灾害问题，甚至会诱发地震[2]。

矿产资源大规模开采引发的资源与环境危机日益突出。吉林省梅河口市中型阶地砂金矿床，采金结束后因环境破坏使得 300 hm^2 耕种土地被废弃，对当地的生产生活造成无法弥补的损失[3]。因此，矿产

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20130003120009）；国家自然科学基金（41402211）

作者简介：李仙波（1982—），男，博士研究生，主要研究方向：水环境污染控制与修复

通信联系人：左锐，副教授，主要研究方向：水环境污染控制与修复. E-mail: zr@bnu.edu.cn

资源开发中生态环境保护的重要性日益突出，其中水土流失问题已成为当今国内外环保生态科学与工程领域的研究热点。目前，国内对金矿开采中水土保持工作的研究主要集中于对水土流失的现状分析，以及对水土流失的诱发因素、分布特征、危害程度等方面[4~5]，但对金矿开发过程中可行保护措施的探讨相对较少。研究以典型生态脆弱区巴彦淖尔市乌拉特前旗为研究区，以某金矿开采过程为研究对象，对金矿开采和堆浸对区域水土流失的影响程度进行深入分析，并针对性地提出具体的防治水土流失的工程措施和植被措施，使金矿开发的生态效益与经济效益兼顾，实现可持续发展。

1 自然环境概况

矿区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗，地处阴山山脉西段的色尔腾山北部边缘，属低山丘陵区地貌，区内植被稀少，位置如图 1 所示。地形受区域构造线控制，形成山川相间的地形。海拔标高 1 629.0～1 914.3 m，相对高差 285.0 m，山谷呈“U”形或箱形冲沟，谷底平均坡降 11‰. 矿区大地构造属华北地台内蒙台隆的阴山断隆，主要构造线方向近东西向，基底由上太古界乌拉山群和色尔腾山群构成，盖层为中元古界渣尔泰山群及中生界中、下侏罗统石拐群，下白垩统固阳组等，其他时代地层分布很少，如图 2 所示。含矿带与金矿床均赋存于晚太古界色尔腾山群岩浆热液作用形成的石英脉与白云常合山钾长花岗岩体石英脉及硅化蚀变岩中。矿区矿石储量 2 000 万 t，平均出矿品位为 0.5 g/t，整体品位较低。



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

矿区为典型的荒漠生态脆弱区，属中温带半干旱大陆性季风气候，矿区多年平均气温 7.1℃，多年平均风速 3.15 m/s，最大风速 26 m/s，多年平均降雨量 210.70 mm，年均蒸发量 2 398.64 mm，最大冻土深度 1.76 m. 项目区所在地土壤多属石砾质粗骨型土壤，土壤类型以棕钙土为主，土层较薄，厚度一般在 0.2～1.2 m 范围内，结构松散。土壤养分、有机质含量低，表层至 20～30 cm 处为腐殖质层。项目区所在地植被类型为荒漠草原，该区域植被稀疏，群落结构简单，无明显层次。植被覆盖度在 20%，每平方米的植物种类 3～5 种，丛生小禾草高度 6 cm 左右，小灌木高度 25 cm 左右，草群产量以多年生草本植物为主。群落中分布的植物种类主要以菊科的冷蒿、猪毛蒿、沙兰刺头，豆科的小叶锦鸡儿、柠条、甘草，禾本科的小针茅、冰草等为主要植物种。

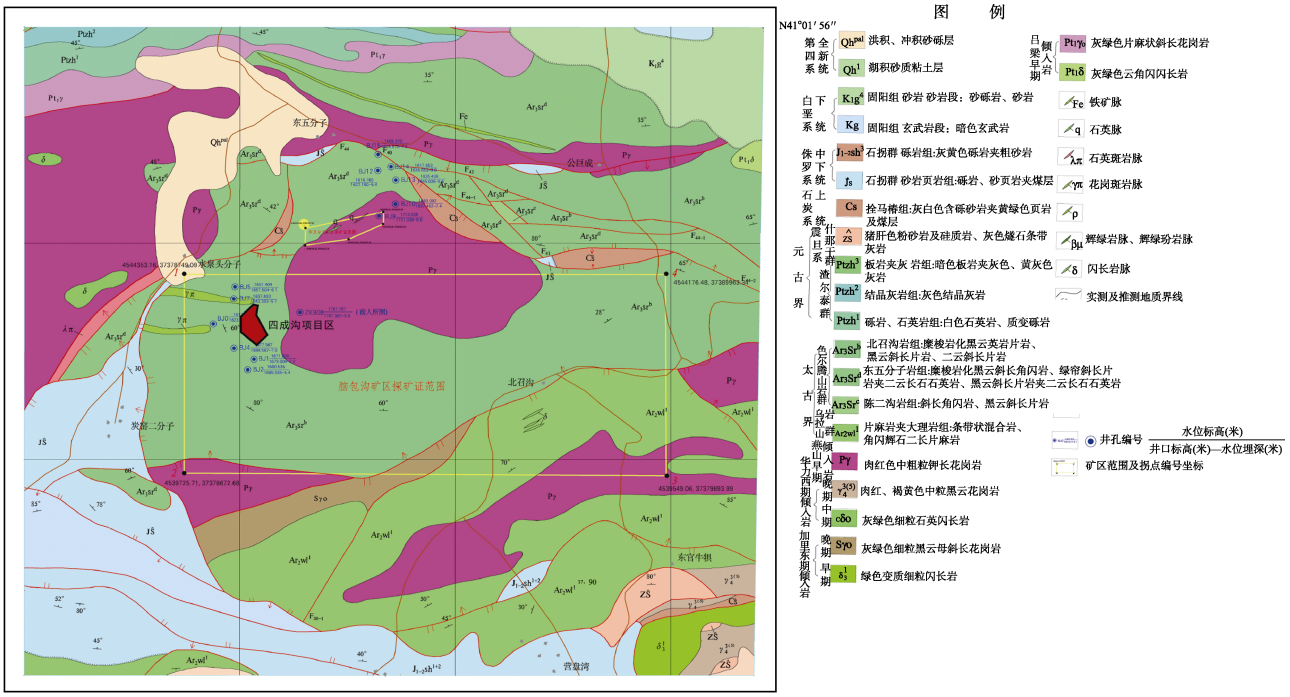


图 2　矿区区域地质图

Fig. 2　Regional geological map of mining area

2　区域水土流失现状

矿区所在乌拉特前旗属黄河流域，水土流失主要为水力侵蚀和风力侵蚀，其土壤侵蚀统计如表 1 所示。水力侵蚀面积主要分布在乌拉山后的山区和丘陵区，侵蚀以轻度、中度为主。其中，轻度侵蚀面积为 1 863.78 km^2，占侵蚀面积的 75.41%，中度侵蚀面积为 604.1 km^2，占侵蚀面积的 24.44%. 风力侵蚀区主要分布在乌拉山后的沙化草原和半农半牧区，侵蚀以中度、强度和剧烈为主。其中，中度侵蚀面积为 68.86 km^2，占侵蚀面积 18.31%，强度侵蚀面积为 65.15 km^2，占侵蚀面积 17.33%，剧烈侵蚀面积为 85.37 km^2，占侵蚀面积 22.71%，水蚀与风蚀交错区面积为 720.32 km^2，占侵蚀面积 25.30%.

表 1　乌拉特前旗土壤侵蚀面积统计（km^2）

Tab. 1　Soil erosion area in Urad front banner (km^2)

侵蚀类型	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	轻度以上	合　计
水力侵蚀	4 573.78	1 863.78	604.10	3.66	—	—	2 471.54	7 045.32
风力侵蚀	54.74	70.81	68.86	65.15	85.75	85.37	375.94	430.68

乌拉特前旗是内蒙古自治区水土流失重点治理区，周边地区开展水土保持工作的时间比较长，国家近年来投资的水土保持工程也有很多，如明安乡六份壕小流域综合治理工程和东柳树沟淤地坝建设工程等。在当地群众积极投劳、集资治理的配合下，林业部门也实施了大面积的退耕还林工程。这些工程的相继实施，有效地治理了研究区的水土流失和风蚀沙化，生态环境逐步得到改善。

3　水土流失成因

金矿开发过程中造成水土流失的主要因素一般归结为 2 个方面：一是自然因素，包括风力、水力等侵蚀外营力和地形地貌、土壤物质组成与结构及植被盖度等抗侵蚀力作用；另一方面由于人类活动作用

导致[6]，包括金矿在开采过程中的开挖回填、场地平整、堆浸筑堆、修筑道路，表土剥离等施工活动，使原地貌、地表植被及土体结构受到破坏失去固土防冲能力，降低或丧失了原有的水土保持功能，改变了外营力与土体抵抗力之间形成的自然相对平衡，最终导致土壤加速侵蚀。同时，剥离土及扬尘在水力和风力作用下也易产生流失和粉尘污染，对周边地区环境造成一定危害，加剧了水土流失的发生和发展，是造成水土流失的主导因素。金矿建设期及生产运行期产生水土流失的人为因素如表 2 所示。

表 2 工程施工和运行各期水土流失因素分析

Tab. 2 Human factor analysis of soil and water loss in construction

名称	时期	产生新增水土流失的人为因素
选矿工业场地	施工期	场地平整、人工筑堆、建筑物基坑开挖、临时堆土等，使地面裸露、表土破损、破坏原地貌及植被，产生水蚀及风蚀
堆浸场	施工期	场地平整、人工筑堆、临时堆土等，使地面裸露、表土破损、破坏原地貌及植被，产生水蚀及风蚀
道路系统	施工期	形成挖损、堆垫地貌，产生水蚀及风蚀
供水管线	施工期	施工扰动产生水蚀及风蚀
供电线路	施工期	杆基开挖等施工，产生水蚀及风蚀
选矿工业场地、堆浸场、道路系统、供水管线、供电线路	自然恢复期	裸露地表尚未恢复原状、植物措施尚未完全发挥水保作用，仍有一定量的水蚀及风蚀
堆浸场	运行期	人工筑堆，堆积松散

4 对水土保持的影响与危害

研究区为植被稀少的低山丘陵区，区内沟壑纵横，风力侵蚀强烈，水土流失严重，致使环境容量小，生态环境脆弱，属于内蒙古自治区水土流失重点治理区。同时，由于该矿矿石品味较低，随着开采量不断增大，对矿区周边生态环境的扰动面积也不断加大。尤其是大量弃土弃渣、堆浸筑堆等导致的水土流失、地表植被枯萎、土地沙化等有关问题接踵而至，使生态环境和当地居民的健康面临较大威胁。

1）破坏植被覆盖度，减小地表抗侵蚀性。金矿在建设期的工业场地平整，堆浸场基础开挖、运输道路路基开挖及填筑，供水管线开挖及电杆杆基开挖等人工扰动首先破坏了场区内的草场，破坏和影响了施工区周围环境的植被覆盖率和数量分布，损失了一定的植被生物量，促使场地植被生态服务功能进一步衰退；加之低品位金矿堆浸场的施工开采面积较大，扰动了大面积的原地貌，使其抗蚀性、抗冲性大大降低，在雨水的击溅冲刷下，极易造成水土流失[7~8]。

2）改变土体结构，增加水土流失物质源。金矿施工过程中的工程场平、管沟开挖会产生大量开挖弃土。建设期工程动用土石总方量 16.09 万 m^3，其中挖方量 8.79 万 m^3，填方量 7.30 万 m^3，弃方量 1.49 万 m^3；运行期工程动用土石总方量 421.8 万 m^3，主要为运行期产生的浸渣。这不仅破坏了原地貌，还使开挖后的弃土成为裸露和无防护的松散堆体，彻底改变了原来的土体结构状态，使土壤松散性加大，抗蚀力降低，遇降水径流易冲刷崩解，不但使其原有的保水保土功能消失，而且极易被降水冲刷带走，成为水土流失物质源，加大了水土流失的强度[9]。

3）提供扬沙等物质源，降低空气质量。采矿业是扰动土地最多且对生态环境破坏最严重的行业之一[10~11]，矿区大规模的施工弃卸、碾压，产生大量松散土石，经开挖扰动后土壤中的含水量极低，尤其是管线开挖临时堆土区和道路施工区，在当地强劲大风的作用下会成为局部风沙源地，促进扬沙天气的形成，造成矿区比较严重的粉尘污染。这不仅给区域环境状况及交通业带来负面影响，而且还会对人体健康产生影响甚至危害，增加大气总悬浮颗粒物中可吸入颗粒物含量；此外，降尘中的有毒物质和致病菌还可以通过其他途径，如水、土壤和植物等介质进入到人体，对人类健康造成危害[12]。

4）增加地下水污染含量。采矿业中破碎筛分车间地面设备冲洗水以及吸附车间地面冲洗水等含油废水未经处理进入地下水，同时在堆浸过程中需添加大量的药剂氰化钠，堆浸场内汇水处置不当渗入地下，将会对地下水造成危险。

5）增加黄河泥沙含量。研究区属黄河流域，金矿开采加剧了原地貌的风蚀过程。随着风蚀量的增加，沙土被风吹蚀跃移进入河流，长期以往会增加黄河和附近其他河流的泥沙含量。另外，施工建设形成松散的土体堆积物遇强降雨会有大量泥沙随洪水冲走，发生阻塞沟道和增加黄河泥沙含量的可能。

5 水土保持的保护措施

金矿开采的工程设施一般包括选矿工业场地、堆浸场、道路系统、供水管线及供电线路等。在这些工程建设过程中，大面积的场地平整、工程开挖等活动，会导致较大面积的水土流失、地表植被枯萎、土地沙化等有关问题。针对这些问题及其危害，必须采取相应的防护措施，如边坡防护、截水沟、表土剥离及绿化区覆土整治等措施，既可以有效地保护主体工程的运行安全，又可实现防治区域水土流失，保护当地生态环境。

5.1 工程措施

1）边坡防护。该工程需要在选矿工业场地以及堆浸场道路的修建过程中对山体进行部分挖方，从边坡稳定的角度讲，项目的土方开挖量较大，仅回收车间和办公楼挖方 0.30 万 m^3，形成挖方段 210 m 的边坡，边坡平均高度为 1 m. 因此，在施工建设期，应将地表挖方移挖作填、纵向利用，使挖方得到充分利用；同时由于堆浸场挖方量较大，可以将挖方用于场内道路的堆垫，实现高效利用；堆浸产生的浸渣不排弃，堆放于场地内，避免另设废石场占地，可以有效控制对地面的扰动及植被的破坏，减少投资和对自然环境的破坏，有利于防治水土流失；最后，应对选矿工业场地进行边坡防护。根据《开发建设项目水土保持技术规范（GB 50433—2008）》[13]设计要求，结合区域棕钙土相对稳定性较差的土壤特征，研究对金矿挖方边坡采用 0.3 cm 厚浆砌石片砌护，护坡设计如图 3 所示。

2）截水沟。虽然研究区区域降水稀少，但丰水期山体汇水对选矿工业场地内部生产运行和堆浸场道路安全仍然会造成一定影响，如对开挖边坡的冲刷。因此，在选矿工业场地和堆浸场道路开挖边坡顶部设置截水沟，拦截坡面汇水对边坡稳定和安全有重要的作用。防护措施要结合当地气象条件和场地特点，确定场地内部地表水的排放方式，采用顺自然地势径流方向的场地标高、场地坡度来建立排水措施，同时结合防洪排导及降水蓄渗工程的设计要求，采用浆砌石梯形结构，底宽 0.40 m，深 0.60 m，边坡比 1∶1，浆砌石厚 0.30 m，砂砾石垫层 0.15 m. 这样建成后的截水沟顺应自然地形及场平后的坡度，使得场地排水顺利进入排水沟实现外排。截水沟断面如图 4 所示。

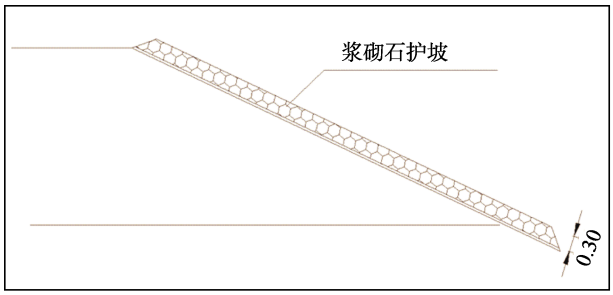


图 3 边坡防护措施（m）
Fig. 3 Slope protective measure (m)

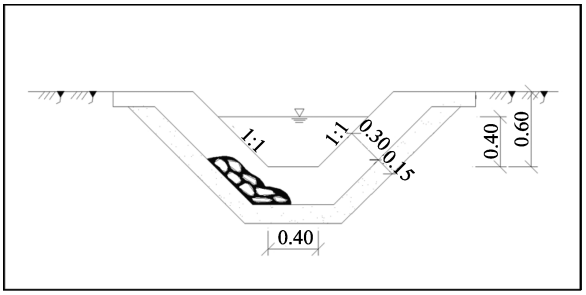


图 4 截水沟断面设计（m）
Fig. 4 Intercepting drain section (m)

3）挡水围堰。金矿开采活动中除了场地开挖存在的边坡失稳，表土堆放场一般由于地处坡地，加之表土堆放时间较长，剥离土结构松散，在水力、风力及重力的作用下，也易产生滑落及塌陷等水土流失问题，对研究区的水土保持工作存在着一定的威胁，因此还应对表土堆放场外围进行挡水围堰，减少坡面汇水的冲刷。挡水围堰就地取材，针对防洪排导及降水蓄渗工程的设计要求，采用干砌石梯形结构，长度为 255 m，顶宽 0.50 m，底宽 3.50 m，高 1.50 m，边坡比 1∶1，如图 5 所示。

4）排水沟。道路系统、供水供电系统作为线性施工活动场所在金矿场区中广泛分布，因此对水土保持也会产生较大影响，如路面、坡面和路基两侧在雨季汇集的地表水会威胁路基边坡的稳定，为了及时排除及疏导此类汇水，应在道路路基两侧布设排水沟防护工程。根据防洪导排及降水蓄渗工程的设计要求，排水沟断面设计采用矩形断面，沟深 0.60 m，浆砌块石衬砌，浆砌石厚 0.30 m，下设砂砾石垫层，浆砌石厚 0.30 m，底宽 0.40 m，排水沟断面如图 6 所示，排水沟工程量如表 3 所示。

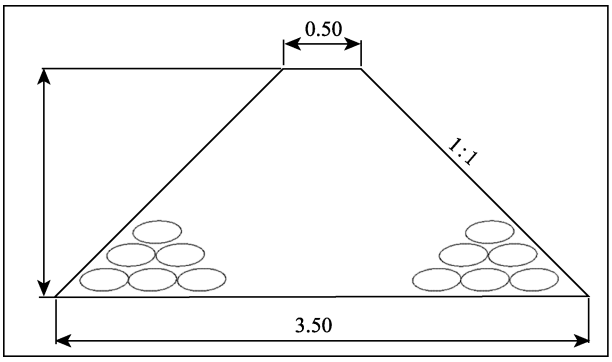


图 5 表土堆放场挡土围堰设计（m）

Fig. 5 Retaining structure section in surface soil stacking site (m)

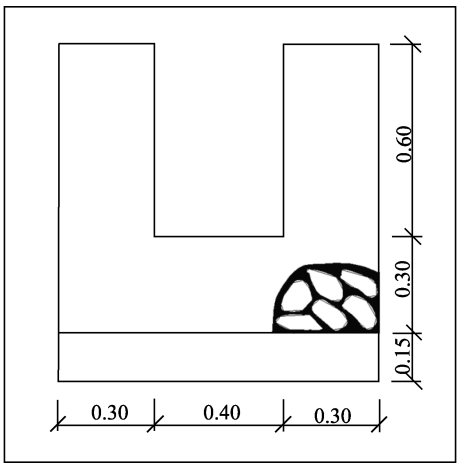


图 6 道路排水沟断面（m）

Fig. 6 Intercepting drain section of the road (m)

表 3 新建道路排水沟工程量分析

Tab. 3 Drain engineering quantity of new road in heaping leaching site

工程项目	长度/m	土方开挖/m^3	浆砌片石/m^3	砂砾垫层/m^3	工程占地/hm^2
进场道路	2 000	2 100	1 322	302	0.40

5）表土剥离及绿化区覆土整治。为了给施工扰动区植被恢复创造条件，根据《开发建设项目水土保持技术规范（GB 50433—2008）》[13]中的植被建设工程和防风固沙工程的要求，在场地平整前先对表层熟土进行剥离，剥离表土集中堆放在表土堆放场以减少更多的临时占地，并在绿化区植被恢复时对其进行覆土整治，为植被措施的实施奠定基础。堆浸场剥离表土工程量如表 4 所示。

表 4 堆浸场剥离表土工程量统计

Tab. 4 Engineering quantity of peeling surface soil in gold heaping leaching site

选矿工业场地	剥离面积/hm^2	剥离厚度/m	剥离土方量/万 m^3
堆浸场	6.21	0.20	1.24

5.2 水土保持的植物措施

植被不仅是陆地生态系统中十分重要的自然资源，而且可以调节气候，稳定大气，缓冲干扰，涵养水源，保持水土，调节土壤肥力，保护和提高生物多样性等[14]，在人类社会生存和发展的过程中发挥着十分重要的生态服务功能。尤其在生态脆弱区，植被对于水土流失的防治具有重要意义[15]。在金矿开采区，采取合理的植物措施不仅可以有减弱降雨能量，同时还可以拦蓄降水，改善土壤理化性质，增加土

壤入渗量，提高土壤的固结程度，从根本上阻止和减缓风力、水力对土壤的侵蚀。

场地周边区域，在考虑植被恢复的前提下，金矿场区内选矿工业场地、堆浸场、新建道路系统、供水管线、供电线路等施工扰动区均可种植植被，尽量将绿化和美化相结合，营造一个良好的工作环境。同时，充分发挥植物多样性的特点，在植被选择时，乔灌草合理配置，宜乔则乔，宜灌则灌，宜草则草，形成综合稳定的防护体系。在草树种选择方面，应本着“因地制宜、适地适树适草”的原则，根据金矿开采的特点，并结合矿区干旱半干旱的荒漠生态脆弱性、有机质含量较低的棕钙土土壤条件，在充分调查工程所在区域乡土树种、草种，并在分析其生物学、生态学的基础上，可以选择耐碱、耐寒、耐旱、耐风沙的羊草、披碱草、柠条、油松、榆树、油蒿和锦鸡儿等植被。研究区适宜的草、树种如表 5 所示。图 7 为选矿场地植被种植示意图。

表 5　工程建设区适宜草树种及花卉筛选结果

Tab. 5　Varieties of trees, grass and flowers in the engineering area

名称	优选草树种及花卉
选矿工业场地	油松、榆树、羊草、披碱草
堆浸场	羊草、披碱草、油蒿、锦鸡儿
新建道路系统	柠条、油蒿、锦鸡儿
供水管线	羊草、披碱草
供电线路	羊草、披碱草

6　结论

研究区属典型的北方农牧交错生态脆弱区，气候干旱，水资源短缺，土壤结构疏松，植被覆盖度低，容易受风蚀、水蚀和人为活动的强烈影响，且环境承载力低，易受人类活动的影响。区内金矿开采加剧了其生态脆弱特征，其原因和危害主要包括：1）矿区的生产建设占地直接影响周边植被生长，引起草场及其生态功能的退化；2）金矿开采过程中场地平整等施工活动破坏了原地貌，形成大量松散堆积物，加速土壤侵蚀，加剧生态脆弱程度； 3）采矿活动客观上提供扬沙等物质源，降低空气质量，增加黄河泥沙含量。该类型地区金矿开采可采取的措施包括工程措施和植被措施两类，其中具有实际操作性的工程措施主要有边坡防护、截排水沟、挡水围堰、表土剥离及绿化区覆土整治等，植被措施需要遵循因地适地和植被多样性的原则，选择适宜于本区的羊草、披碱草为主要植被措施，为区域水土保持起到了积极作用。

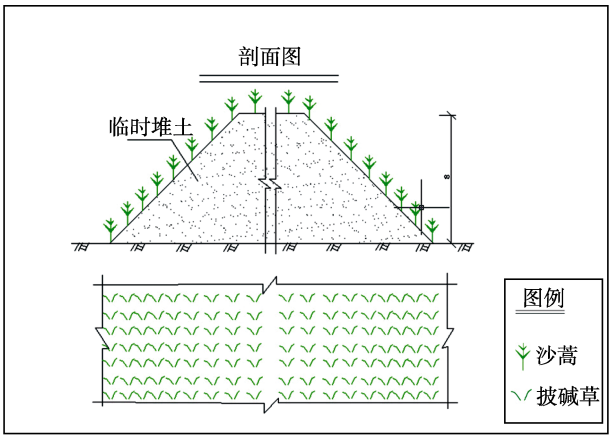


图 7　选矿场地剥离表土植被种植设计

Fig. 7　Grass planting on peeling surface soil in mineral processing industrial site

[参考文献] (References)

[1] 刘瑛，杨丹青，杨晓晖. 煤矿开采对矿业城镇生态承载力的影响研究[J]. 干旱区资源与环境，2009，23（9）：24-28.
LIU Y, YANG D Q, YANG X H. Effect of coal mining on town biologically productive capacity[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(9): 24-28. (in Chinese)

[2] 李惠娣，杨琦，聂振龙，等. 脆弱生态环境对干旱区采矿的响应与对策——以毛乌素沙漠边缘矿区为例[J]. 干旱区资源与环境，2003，17（5）：30-35.
LI H D, YANG Q, NIE Z L, et al. Response of vulnerable ecological environment to mining collapsing in arid area: an example in mining at the margin of Maowusu dessert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(5): 30-35. (in Chinese)

[3] 金洪涛，贾伟光，邸志强，等. 我国砂金矿开采造成的环境地质问题与对策[J]. 地质与资源，2004，13（1）：30-34.
JIN H T, JIA W G, DI Z Q, et al. The problems of environmental geology and solution in cold placer-mining in China[J]. Geology and Resource, 2004, 13(1): 30-34. (in Chinese)

[4] LIU W, WANG R R, LIU X M. Effects of different soil and water loss control measures on the dung beetle assemblages in Huangfuchuan watershed, Inner Mongolia of North China[J]. The Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 777-787.

[5] LIU G C, DAI F Q, NAN L, et al. Assessing the suitability of soil and water conservation practices in Southwestern China[J]. Land Use Policy, 2013, 30(1): 319-327.

[6] 刘彬，罗承德，宫渊波，等. 生态脆弱区水土保持研究[J]. 中国水土保持， 2012（1）：27-30.
LIU B, LUO C D, GONG Y B, et al. Soil and water conservation of ecological fragile zone[J]. Soil and Water Conservation in China, 2012 (1): 27-30. (in Chinese)

[7] 吴楠，何方，高吉喜，等. 淮河上游山丘区土壤保持功能变化及价值评估[J]. 安徽农业大学学报，2010，37（1）：75-81.
WU N, HE F, GAO J X, et al. Dynamic change of soil retention function and evaluation on its economic value in mountainous area of upper Huaihe river basin[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2010, 37(1): 75-81. (in Chinese)

[8] 张雪英，黎颖治. 生态系统服务功能与可持续发展[J]. 生态科学，2004，23（3）：286-288.
ZHANG X Y, LI Y Z. Ecosystem services and sustainable development[J]. Ecologic Science, 2004, 23(3): 286-288. (in Chinese)

[9] 马英武，古力巴哈. 准东矿区露天矿排土场的水土流失问题与对策[J]. 中国水土保持科学，2013（12）：85-88.
MA Y W, GULIBAHA. Problems and countermeasures for the soil and water loss in the spoil ground of Zhundong open-pit mine[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013(12): 85-88. (in Chinese)

[10] 杨净，王宁. 夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学, 2013，32（3）：595-600.
YANG J, WANG N. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils from Jia-Pi-Gou gold mine area, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 595-600. (in Chinese)

[11] 杨新兴，冯丽华，尉鹏. 大气颗粒物 PM2.5 及其危害[J]. 前沿科学，2012，6（21）：22-31.
YANG X X, FENG L H, YU P. Air particulate matter PM2.5 in Beijing and its harm[J]. Frontier Science, 2012, 6(21): 22-31. (in Chinese)

[12] 吴楠，何方，姚孝友，等. 基于 RS 和 GIS 的淮河上游山丘区土地利用方式与土壤侵蚀强度的研究[J]. 安徽农业大学学报，2007，34（4）：589-595.
WU N, HE F, YAO X Y, et al. Research of land use and soil erosion in upstream massif area of Huaihe river basin based on RS and GIS[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2007, 34(4): 589-595. (in Chinese)

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中国人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50433—2008 开发建设项目水土保持技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50433—2008 Technical code on soil and water conservation of development and construction projects[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)

[14] 潘德成，孟宪华，吴祥云，等. 不同气象因子及植被类型对矿区排土场扬尘的影响[J]. 干旱区资源与环境，2014，28（1）：136-141.
PAN D C, MENG X H, WU X Y, et al. The effects of different meteorological factors and vegetation types on dust of mine dump[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(1): 136-141. (in Chinese)

[15] 赵同谦，欧阳志云，贾良清，等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报，2004，24（6）：1101-1110.
ZHAO T Q, OUYANG Z Y, JIA L Q, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1101-1110. (in Chinese)