

沙漠地区大型供水工程建设的关键技术与方法

邓铭江¹, 王远超², 李江³, 李生字⁴, 李新¹

(1. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆伊犁河流域工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;
3. 新疆水利水电规划设计管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 北疆供水工程由北向南纵贯准噶尔盆地, 其中穿越古尔班通古特沙漠的明渠全长 166.5 km。20 世纪 90 年代, 针对该建设工程, 围绕渠道选线、沙基压实、渠床加固、防风固沙、生态环境保护等方面, 采用理论研究、技术开发、试验示范, 采取科学试验和工程实践相结合的方法, 结合 12 a 的安全运行和动态监测, 经过系统分析与评估, 总结出一套针对沙漠地区明渠建设的集成技术与方法: (1) 采用“渠、林、路集中条带布置”的“平台”建设模式, 具有对沙漠扰动小, 机械化施工效率高, 便于运行管理的优点; (2) 渠床风积沙和砂砾石垫层“沙-砂水平同起”干碾压实技术, 解决了沙漠地区缺水条件下土料压实以及渠道边坡 2 种不同特性土料同时压实的技术难题; (3) 集成创新了机械固沙与生物治沙技术, 充分利用沙漠悬湿沙层土壤水分, 建成了 110 km 无灌溉生物防沙带, 构建了防风固沙-减速沉沙-阶梯拦沙的多梯次综合防沙技术体系; (4) 结合生物治沙, 沿渠道两侧构筑了人工植被修复景观, 建设野生动物迁徙通道, 改善饮水条件, 增加了区域生物多样性, 在沙漠中形成了一条绿色生态走廊。

关键词: 水利工程; 沙漠渠道; 沙基压实; 渠床加固; 防风固沙; 生态保护

中图分类号: TV 69

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)12-3085-10

Key methodologies for constructing large-scale water supply canals in desert

DENG Mingjiang¹, WANG Yuanchao², LI Jiang³, LI Shengyu⁴, LI Xin¹

(1. Xinjiang Ertix River Basin Development Engineering Construction Management Bureau, Urumqi, Xinjiang 830000, China;
2. Xinjiang Ili River Basin Engineering Construction Management Bureau, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 3. Xinjiang Planning and Design Administration Bureau of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830000, China;
4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The water supply project in Northern Xinjiang traverses the Junggar Basin from north to south. The open canal in Gurbantungut Desert is 166.5 km long. In the 1990s, a series of theoretical research, experiments and engineering practices were carried out regarding the field layout of canal line, sand foundation compaction, canal bed strengthening, wind prevention, sand fixation and eco-environment protection et al. After twelve years of operation and monitoring, the following conclusions are drawn through systematic analysis and evaluation: (1) the mode of the concentrated band arrangement for canal, shelterbelt, and road on platform has the advantages of small disturbance to desert, high efficiency in mechanized construction and management. The rolling and compaction technologies of sand foundation, wind-blown sand of canal bed and sand-gravel cushion resolved the technical problem for soil compaction and the compaction of two types of soils in the canal slopes simultaneously

收稿日期: 2017-03-23; **修回日期:** 2017-08-03

作者简介: 邓铭江(1960-), 男, 博士, 1982年毕业于新疆八一农学院水工建筑专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事水利工程建设 and 干旱区水循环调控方面的研究工作。E-mail: xjdmj@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0281

in the desert. (3) Using the soil water in the suspension wet sand layer, a biological sand control belt of 110 km long has been built with the mechanical sand fixation and biological sand control. A comprehensive sand prevention technology system including the wind prevention, sand fixation, deceleration of the sand and stepped sand blocking has been constructed. (4) The migration paths of wild animals are guaranteed. Using the biological sand control technology system, the vegetation landscape has been constructed along both sides of the canal. The biodiversity has been increased by improving the conditions of drinking water. A green ecological corridor has been built in the Gurbantungut Desert.

Key words: hydraulic engineering; canal in desert; sand foundation compaction; canal bed strengthening; wind prevention and sand fixation; ecological protection

1 引言

新疆北疆供水工程穿越准噶尔盆地的古尔班通古特沙漠,全长 900 余千米,其中沙漠明渠总长 166.5 km,属大型长距离供水工程,为天山北坡经济带提供了重要的水资源保障,对区域可持续发展具有十分重大的战略意义。工程沿线是绵延起伏的固定、半固定沙漠,沙层最大厚度达 200 m,地下水埋深达 40~150 m。沙漠地形复杂,交通运输极度困难;夏季酷热,冬季严寒,干旱多风,风沙活动频繁;降水稀少,蒸发强烈,植被稀疏,生态极其脆弱。在这种恶劣的风沙环境下建设大型沙漠明渠供水工程是一项重大的沙漠工程建设技术挑战。

20 世纪 90 年代初,围绕该大型供水工程建设,在渠道选线、沙基压实、渠床加固、防风固沙、生态保护等方面,开展了一系列理论研究、技术开发、试验示范,构建了沙漠、严寒、长距离供水工程关键技术体系。2005 年该工程建成通水,迄今已安全运行 12 a,极大地改善了沿线生态环境。

明渠穿越沙漠,风沙危害大,蒸发渗漏水量损失大,因此世界上沙漠地区的引水工程多采用管道输水,如利比亚引水工程^[1]、以色列北水南调工程^[2]。我国甘肃省民勤中型输水工程,由于输水流量较小,采用钢筋混凝土箱涵穿越沙漠^[3]。由于管道或暗涵输水投资较大,也有部分引水工程采用明渠输水。如卡拉库姆运河^[4]、美国科罗拉多引水工程^[5]、加州南部引水工程^[6]、印度萨达尔萨罗瓦调水工程^[7]。已建的沙漠明渠工程在渠道衬砌结构和防沙治沙工程建设方面均存在较大差异。

土库曼斯坦的卡拉库姆运河,为解决渠床湿陷变形问题,大部分不衬砌,采用浸水方法施工^[4],埃及尼罗河向西奈半岛引水工程、美国科罗拉多引水工程和加州南部引水工程,沙漠明渠均采用现浇

混凝土板衬砌^[6, 8],工程投资大。考虑到古尔班通古特沙漠具体情况,本工程渠道内边坡 1:2.5、外边坡 1:3,采用土工膜防渗和预制混凝土板块衬砌,耐久性和防渗效果好,投资省,施工便捷,能较好地适应沙基变形。

沙漠明渠工程建设是一项涉及渠道选线、沙基压实、渠床稳定、防风治沙、工程造价等多方面的系统工程。从已建的沙漠明渠供水工程来看,均未建设系统的防风治沙工程^[6, 8-10]。根据古尔班通古特沙漠地区的气候条件、植被状况、风沙活动等特性,经过论证,表明沙漠明渠方案具有较好的技术可行性和经济合理性。

本文针对近 20 多年来在沙漠建造大型供水工程建设中所遇到的关键问题及其对策进行了分析,总结出一套针对沙漠地区明渠建设的集成技术与方法。

2 自然地理环境

(1) 气候特征

准噶尔盆地位于新疆北部,介于阿尔泰山和天山之间,东西长约 360 km,南北宽约 450 km,面积 38 万 km²,平均海拔 500~1 000 m。盆地中部分布着我国第二大沙漠——古尔班通古特沙漠,其面积约 4.88 万 km²,沙漠腹地年降水量 70~120 mm,主要集中在 5~8 月和 10~12 月,冬季有稳定积雪,年蒸发量 2 800~3 000 mm(20 cm 蒸发皿),夏季平均气温 24 °C~27 °C,最高气温可达 45 °C 以上,冬季平均气温 -23 °C~-28.5 °C,极端最低 -45 °C,属典型的内陆干旱气候;区内多风,年大风(风速≥17 m/s)日数每年超过 10 d,边缘地区超过 50 d,集中出现在 4~9 月,潜在的风沙危害严重^[9]。

(2) 地貌特征

风沙地貌以树枝状沙垄为主,南部边缘分布有

梁窝状沙丘与蜂窝状沙丘, 沙垄长度从数百米到十余公里, 高度北部为 10~20 m, 中部和南部为 20~60 m, 最高可达 70 m; 沙垄间距北部为 1~2 km, 中部和南部为 150~500 m。明渠沿线沙垄最大密度为 6.5 条/km, 固定和半固定沙丘占 80% 以上, 固定沙丘植被覆盖度 40%~50%, 半固定沙丘覆盖度 15%~25%, 沙漠地表普遍覆盖着厚约 1 cm 的生物结皮。生物结皮是由细菌、真菌、蓝绿藻、地衣和苔藓植物等孢子植物类群与土壤形成的有机复合体, 固沙作用十分明显^[10]。沙丘活动区多见于沙垄顶部, 因风蚀形成条带状流沙, 宽度约 30 m。

(3) 植物种类

渠道沿线植物种类贫乏, 分属 5 种系属^[11], 灌木类植物有: 梭梭柴(*Haloxyylonammmodendron*)、白梭梭(*Haloxyylonpersicum*)、沙拐枣(*Calligonummongolicum*) 以及几种怪柳(*Tamarixchinensis*); 小灌木和半灌木植物有: 驼绒藜(*Ceratoideslatens*)、琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)、沙漠绢蒿(*Seriphidiam santolinum*)、无叶豆(*Eremosparton songoricum*)、樟味藜(*Camphorosma monspeliaca*) 等; 多年生草类有: 羽状三芒草(*Aristidapennata*)、细叶鸢尾(*Iris tenuifolia*)、兔唇花(*LagochilusilicifoliumBunge*)、沙生针茅(*Stipaglareosa*)、沙葱(*Alliummongolicum*) 等; 一年生植物有: 角果藜(*CeratocarpusarenariusL.*)、猪毛菜(*Salsola arbuscula*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*) 等; 短命类植物有: 旱麦草(*Eremopyrum triticeum* (Gaertn.) Nevski)、齿稗草(*Schismus arabicus*)、四齿芥(*Tetracme quadricornis*)、荒漠庭荠(*AlyssumdesertorumStapf*)、沙生千里光(*Senecio subdentatus*) 和簇花芹(*Soranthusmeyeri*)、独尾草(*Eremuruschinensis*)、沙苔(*Carexphysodes*) 等。在雨水丰盛的年份, 短命植物生长旺盛。

(4) 沙丘活动变化特征

渠道沿线大部分沙丘呈固定、半固定状态, 移动速度较缓慢。植被和地表生物结皮在减弱地面风速、保持沙面稳定、降低风沙活动强度等方面, 发挥了极为重要的作用。由于滥砍、滥伐、滥挖以及石油勘探开发等人为活动影响, 20 世纪 50~80 年代, 沙漠边缘的灌木林面积减少了 68.4%, 植被覆盖度由 40%~50% 下降到 10%~20%, 沙丘活化程度增强, 局部地区出现流沙活动, 沙丘年移动距离达 5 m 以上。近些年来, 由于开展生态保护和天然植被保育, 沙丘活化现象得到一定程度的遏制^[12]。

3 环境、水文及地质条件

3.1 渠道沿线风沙运动规律

渠道沿线风积沙以细沙(0.075~0.25 mm)和中砂(0.25~0.50 mm)为主, 含量分别占 45.6%~56.5%, 26.6%~32.3%, 平均粒径 0.22 mm, 不均匀系数 1.96~2.27, 曲率系数 1.11~1.22, 细度模数 0.4~1.4, 颗粒均一, 无黏聚性, 为含粉土的细粒砂, 松散沙面为风沙运动提供了丰富的物质来源。该区春季多风, 且多发大风。渠道沿线平均风速由北向南递减, 沙漠腹地风速最小(见表 1)。地表生物结皮破坏后, 扰动沙面起沙风速为 4.5~5.0 m/s^[12]。风沙运动是贴近沙面的沙粒搬运现象, 约 98% 气流搬运沙量集中在距沙面 30 cm 高度范围内, 80% 集中在 0~10 cm 高度范围内(见表 2)。

表 1 沙漠渠道沿线春、夏、秋季主导风向及平均风速
Table 1 Prevailing wind direction and its average speed in spring, summer and autumn along the canal in the desert

观测点	春季			夏季		秋季	
	风向	平均风速/ (m·s ⁻¹)	最大风速/ (m·s ⁻¹)	方向	平均风速/ (m·s ⁻¹)	方向	平均风速/ (m·s ⁻¹)
北部(K0)	NNE	8.2	18.0	NNE	5.1	E	3.3
中部(K42)	N	3.6	20.0	N	4.3	N	2.1
南部(K149)	N	4.0	19.3	W	5.3	W	4.3

注: (1) 冬季地面积雪覆盖; (2) K0, K42, K149 为距沙漠渠道首端 0, 42, 149 km。

表 2 活化沙垄顶部不同高度风沙流输沙量分布
Table 2 Sand content distribution of sand transport flow in different heights on the top of active sand ridge

距离地面高度/cm	输沙量/(kg·h ⁻¹)	沙量占比/%
0~4	27.4	37.1
4~8	21.8	29.6
8~12	12.7	17.2
12~16	5.4	7.4
16~20	2.3	3.1
20~24	2.1	2.8
24~28	0.8	1.1
28~32	0.5	0.7
32~40	0.7	1.0

3.2 工程扰动区植被恢复的水分基础

(1) 工程建设对沙漠地表植被影响

沙漠渠道建设是一种大规模、高强度的人类活动, 施工过程中的起土剥离、弃土压埋、机械碾压等, 造成沙漠植被和地表生物结皮破坏, 对固定半

固定沙丘产生巨大扰动,形成新的沙源。流沙蔓延将进一步加剧对周边环境的沙化侵蚀,影响沙漠生态环境。因此,根据古尔班通古特沙漠的环境特点和工程沙害形成过程,结合工程建设实际,提出了沙害防治和生态环境恢复的科学措施,以确保工程建设和运行安全,这是关系工程建设成败的重大关键科学问题。

(2) 土壤水分垂直分布及季节动态

受降水和蒸散的影响,沙漠土壤水分含量年内存在明显变化,并且在土壤剖面上也有垂直分异。根据土壤含水量的变化幅度,可将土壤表层划分为上、中、下三层,其中0~30 cm为水分变化活跃层,30~60 cm为水分变化过渡层,60~100 cm为水分相对稳定层。沙漠地区冬季地表一般有厚20 cm的积雪,在春季积雪融化,加之降雨集中、蒸发较弱,水分入渗土壤。春季为土壤水分补给阶段。3月中旬,上、中、下三层的平均含水率分别为4.6%~6.8%,1.4%~2.7%,1.3%~2.2%(见图1);至4月下旬,土壤水分下渗到50~60 cm处,上、中、下三层的平均含水率依次为3.4%~4.6%,1.4%~4.7%和1.0%~1.4%。

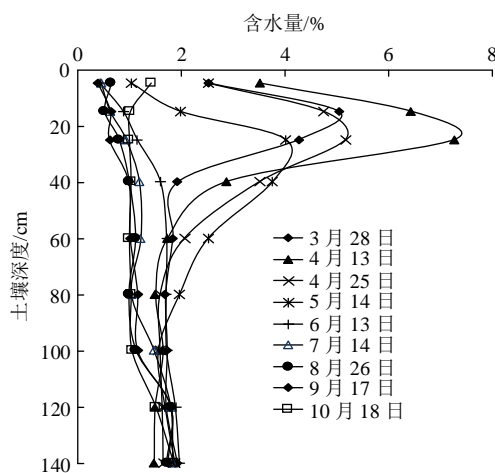


图1 不同时期沙层含水量垂直分布图

Fig.1 Vertical distribution of water moisture content of sand layers in different periods

夏季气温高,蒸发旺盛,为土壤失水阶段。从5月下旬~7月中旬,降水量大多在5 mm以下,仅能湿润表层干沙层,随后很快蒸发殆尽,期间土壤平均含水率低于2%。秋季气温下降,蒸发强度减弱,为土壤慢失水阶段。从8月初开始至11月初,秋季少雨,补给水分也少,沙地水分仍以消耗为主^[13]。冬季气温低,土壤冻结,蒸发很弱,开始形成积雪,为土壤冻结滞水阶段。气温下降到零度以

下,沙地自表层开始冻结,水分多以气态形式向上转移,受气温变化影响,处于冻融交替状态,土壤表层含水量得到补充,最大冻土厚度达到1.4 m。

(3) 植被耗水量与生境修复条件

工程行为不仅破坏地表植被和生物结皮,还改变地形,并影响土壤水分的时空变化。受太阳辐射的影响,阴坡土壤水分明显高于阳坡。坡度影响土壤水分再分布,如坡降较大,重力作用下土壤水分向坡脚汇流侧渗,引起坡上水分存留和下渗量减少。

沙漠植被具有一定的自然恢复能力,受土壤水分含量影响,恢复速率与微地形以及人工沟壑的坡面方向、坡度有密切关系^[14]。通过人工固沙措施辅助,可有效促进植被自然恢复。晚秋和早春土壤上层含水量高、地表蒸发较弱,造林条件最佳,在草方格内植苗或直播种子(梭梭和沙拐枣),4月下旬~5月上旬幼苗即可萌发,并伴生出多种一年生短命植物(如沙葱、猪毛菜、刺沙蓬等)。但在5月底~7月下旬,植物生长期需水加大,为提高其成活率,需采取人工干预措施营造良好水分环境^[15],如人工积雪以加大春季融雪水储备。实践证明,在自然条件下,悬湿沙层可使那些根系生长迅速、抗旱性优良的植物度过干旱少雨的缺水季节。随着植物群落林龄增加,植物生长受土壤水分亏缺的胁迫加大,植株长势随之停滞,植被趋于衰败,水分消耗亦将减少。观测表明,以株行距2 m×2 m种植的梭梭与头状沙拐枣的幼龄、成年龄和过熟龄混交群落,年均蒸腾耗水分别为12.4,44.6和19.6 mm,植被耗水量低于土壤的稳定供水能力^[6-8]。

3.3 鼠害威胁与生态环境保护

(1) 沙鼠活动对生态和工程安全影响

沙漠地区沙鼠种群庞大,平均洞群密度可达10.1个/ha,大的洞群密度可达280~400个/ha,洞穴占地2000 m²/ha,小的洞群密度达15~20个/ha,洞穴占地300~700 m²/ha。沙鼠挖洞破坏地表生物结皮,在洞口形成流沙,在洞穴密集区形成斑块状风蚀流沙地;沙鼠过度啃食植物的幼嫩枝条或根茎也会导致植被长势衰退,甚至死亡。此外,沙鼠还会在渠道基底和边坡打洞,对渠道建筑物的稳定和安全构成极大威胁。

(2) 工程建设对野生动物栖息环境的影响

沙漠渠道工程及伴行公路将区域生境一分为二,造成动物的栖息地割裂破碎,切断了某些季节性迁移动物的迁徙路线,可阻断物种间基因交流,并对动物种群的生态习性及其繁衍产生长远影响。据

研究，脊椎类动物对外界环境影响敏感性顺序为大型兽类>鸟类>小型兽类>爬行类>两栖类。该区最敏感动物为鹅喉羚(*Gazella subgutturosa sairensis*，属国家二类保护动物)，其南北迁徙范围很大，“冬南夏北”的迁徙通道一旦阻断，将改变其分布态势及集群结构。该区还分布有国家一级保护动物波斑鸨(*Chlamydotis undulata*)，受施工噪声影响，将迫使其弃巢迁移。此外，还分布有狼(*Canis lupus*)、赤狐(*Vulpes vulpes*)等食肉兽类，但数量相对较少，工程对其影响相对较小。渠道通水后，将会极大地改善黑顶麻雀(*Pammodendri*)、凤头百灵(*Galerida cristata*)、欧夜鹰(*Caprimulgus europaeus*)等鸟类的栖息环境。该区分布有荒漠沙蜥(*Phrynocephalus przewalskii*)、伊犁沙虎(*Teratoseincus scincus*)、花头蛇(*Psammorhis lineatus*)、绿蟾蜍(*Bufo viridis*)等爬行类和两栖类^[16]，但受工程的影响程度较小。

3.4 风积沙物理力学及工程特性

(1) 风积沙主要物理、力学特性

沿渠道在沙漠北部、中部、南部共选取了 3 个试验段，取 30 m 深的剖面样品，分别在室内和现场进行测试。测试结果表明，古尔班通古特沙漠各区域风积沙的物理、力学特性基本一致。从北到南粒径由粗变细，但变化不大，控制粒径 d_{60} 在 0.12~0.25 mm 范围内，属级配不良的含粉粒细粒土。沙层含水量和干密度垂直变化不大，含水量在 1% 左右，干密度 ρ_d 为 1.58~1.62 g/cm³，相对密度 D_r 为 0.5~0.6。在天然和饱和状态下，快剪内摩擦角分别为 32°~35°，29°~32°，渗透系数 K 为(4.5~9.0)×10⁻³ cm/s，饱和状态下压缩系数 α_{v1-3} 为 0.05~0.09 MPa⁻¹，属低压缩性土；根据原位载荷试验，天然状态与浸水状态沉降曲线变化不大，容许承载力 100 kPa，极限破坏值为 300 kPa^[17]。由于风积沙的渗透系数以及地下水埋深均较大，渠道衬砌配有防渗膜，不会形成大量渗漏并导致较高的地下水位，可以保障沙漠渠道安全运行。

(2) 土体结构及压缩性和湿陷性

风积沙的机械组成以沙粒为主，并含有少量粉粒，基本无黏粒和可溶盐，土体结构为接触式孔隙结构，与湿陷性黄土架空孔隙结构截然不同，其颗粒组成、土体结构及湿陷机制亦有本质区别。这种结构型式极为松散，采用静压法难以有效降低孔隙率，而在振动压力下则会产生强烈压缩变形。天然状态下现场原位试验、压缩试验显示其变形量小，

可判定为低压缩性土；加入适量水后(8%~16%)的变形增大，按其“湿陷系数”可判定为弱~中等湿陷性。两者叠加的变形量只是风积沙压缩变形的一部分，而振动压力条件下的压缩变形，才是风积沙的最大压缩变形量。因此，风积沙是一种“压缩”与“湿陷”变形的散粒土体，振动压实是最为可行的压实方法。

(3) 风积沙压实特性

由图 2 可以看出，含水率由 2% 增至 8% 时，三个试验段风积沙干密度增长较小；含水率由 8% 增至 15.8% 时，干密度较快增长；含水率 15.7% 时，其最大干密度分别达到 1.67, 1.72, 1.69 g/cm³。风积沙烘干后，振动锤击法所得干密度大于轻型击实仪击实后的干密度(见表 3)。现场试验表明，洒水湿碾干密度提高较快，相对密度 D_r 可达 0.8 以上，但这需要现场堆土洒水来实现，工程量巨大；而在天然状态下，振动干碾相对密度可达 0.75 以上，也可满足设计要求^[17]。干燥状态下风积沙经过振动碾压后，能够使颗粒之间摩阻力降低、颗粒重新排列，土体结构发生明显变化，从而达到有效的压密效果。这是风积沙一个十分重要的工程特性，公路交通部门在塔克拉玛干沙漠公路建设中，就对风积沙的干碾振动压实特性开展了研究^[18-19]，利用风积沙这一特性，在缺水的条件下可实现沙基加密处理。

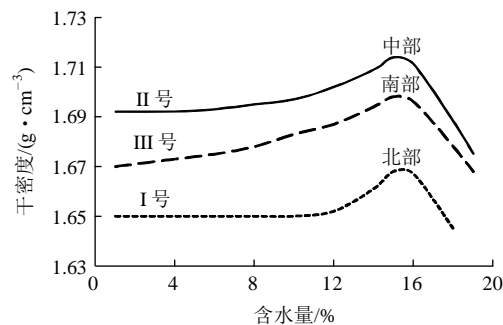


图 2 风积沙干密度与含水量击实试验曲线

Fig.2 The aeolian sand compaction test curves of dry density vs. water content

表 3 风积沙击实和振动击实试验结果对比

Table 3 Comparison of compaction and vibrating compaction for aeolian sand

试验编号	击数	击实试验			烘干样振动锤击后的干密度/(g·cm ⁻³)
		最优含水率/%	最优含水时的饱和度/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	
I	25	15.8	69.6	1.67	1.71
II	25	15.6	74.4	1.72	1.74
III	25	15.7	73.6	1.69	1.73

4 沙漠明渠建设关键技术

4.1 沙漠明渠“集中条带布置”及“平台”建设模式

开创了沙漠明渠“平台”建设模式,研发了“渠、林、路、缆集中条带布置”和“平台先行,道路紧跟,防护同步”的集中开槽式施工新方法,提升了机械化施工效率,最大程度降低了对沙漠环境的工程扰动,便于工程建设与运行管理。

(1) 渠道选线原则

为了工程安全,根据风沙地貌特点和风沙流运动规律进行沙漠渠道选线布置,以最大限度地减少沙害。渠线走向尽可能顺风向布置,保持与沙垄走向大致平行,在沙垄、沙丘之间的稳定地带布线,不宜横穿沙垄,确遇高大沙丘无法避免时,应以30°夹角斜穿沙丘。工程布置应尽可能减少对沙漠原生植被的破坏,施工宽度严格控制在500m以内,而被破坏的地表应及时采取防风固沙措施;渠线穿越高大复合型沙丘群体时,应选择垭口最佳部位,以最短距离通过。根据自然地形,顺等高线布设渠线,渠道纵坡1/7 000~1/8 000。充分考虑土方挖填平衡,弃土应堆放在渠道下风向。

(2) 沙漠明渠“平台”建设模式

按选定渠线,在沙漠中开出一条54~64m宽的条带,将所有的建筑物集中布置在条带“平台”上,按照“平台先行,道路紧跟,防护同步”工序进行施工(见图3)。这种集中带状布置型式和施工管理不仅有利于提高施工效率和减少对沙漠环境的扰动,也有利于后期的工程维修和防风固沙林带的管理,使工程建设区局地生态环境将得到较大的改善。

4.2 沙基和渠床加固干碾压实技术

掌握了风积沙的物理、力学特性,提出了风积沙干碾压实控制参数,解决了沙漠地区缺水条件下的土料压实难题,大幅节省了工程投资;创建了渠床风积沙和砂砾石垫层“沙-砂水平同起”碾压技

术,解决了渠道边坡2种不同特性土料同时压实的技术难题。

(1) 沙基干碾压实控制参数

充分利用风积沙振动压力条件下极易压密的特殊工程性质,施工中采用自然沙土,开展室外大型压实试验,确定最优施工参数。在天然沙土含水量1%~2%状态下,压实干密度主要受压实机械、振动频率、铺土厚度、碾压遍数等因素影响,现场对40, 50, 60 cm不同铺土厚度进行了试验研究,采用振动干碾碾压时,有效影响厚度为50 cm,但表层10 cm始终处于扰动状态,无法压实,只能待下一填筑层碾压时再度压实,因此铺土厚度控制在40 cm以内;采用14~16 t自行式光面振动碾碾压6~8遍(静压2遍、高频低幅2遍,低频高幅2~4遍),相对密度 D_r 达到0.75以上,满足设计和施工规范要求,以北部风积沙为例(见图4),干密度可达1.73 g/cm³以上,如碾压遍数过多,则会导致“过振”,造成已经压实的土体再度振松,干密度下降^[20-21]。

(2) 渠床“水平同起”干碾压实技术

垫层材料是渠道衬砌防渗结构体的稳定基础。工程前期设计时,采用砂砾石、化学固化剂、土工格栅、橡胶膜沙袋、土工膜袋、水洗沙混合砂浆等多种垫层型式。根据大量对比试验结果,综合考虑结构可靠性、施工可操作性、经济合理性等方面的因素,最终选择40 cm厚的砂砾石作为垫层材料。在边坡上将沙基和砂砾石垫层2种不同特性的土料同时压实,具有一定的难度,小型电动式振动碾斜边碾压压实效果差,而大型振动碾在边坡上行走沙阻严重,沙-砂混合条件下,无法得到有效压实。工程实践中创造了“水平同起”干碾压实技术(见图5),即在渠道边坡上砂砾石和沙基水平填筑,“沙-砂平起”,形成碾压平台,沙基预留4~5 cm的超高,采用15 t以上大型振动碾,铺层厚度40 cm,碾压6~8遍后,砂砾石垫层相对密度达到0.85,沙基相对密度达到0.75以上,可同时满足设计要求,

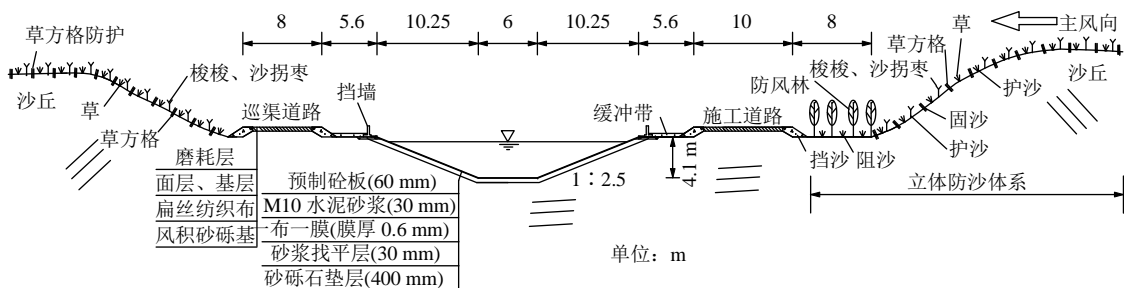


图3 沙漠渠道挖方段典型横断面及防风治沙体系布置图

Fig.3 Typical cross section of excavated canal in the desert and layout of wind prevention and sand fixation system

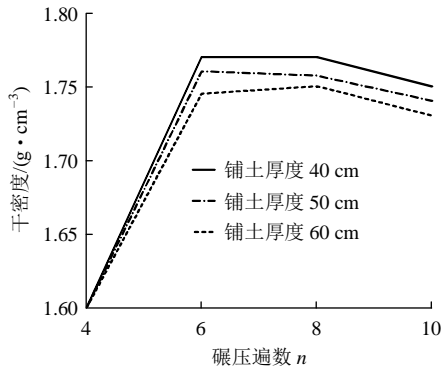


图 4 沙基干碾压实干密度与碾压遍数关系图

Fig.4 Relation between dry density and times of roll compaction for dry sand

且施工效率高^[19, 22]。渠床沙基水平影响宽度为 70 cm 左右、垂直影响厚度为 60 cm 左右。

4.3 沙漠明渠防沙治沙

查明了古尔班通古特沙漠悬湿沙层水分的垂直分异和季节动态变化规律，研发了利用悬湿沙层水分的无灌溉植被恢复技术，集成了机械固沙与生物治沙技术，构建了融合乔灌草植物的综合防沙体系，创立了防风固沙 - 减速沉沙 - 边沟拦沙的多梯次防沙治沙技术模式。

(1) 草方格防风固沙技术

风沙运动是贴近沙表面的沙粒搬运现象，气流搬运沙量绝大多数集中在地表 30 cm 高度内(见表 2)，因此只要沙障达到该高度即可有效阻挡风沙流运动。用水生芦苇做防沙材料，将其截成 50 cm 或 70 cm 长 2 种尺寸，均匀摊铺在沙表面上，用平头锹踩踏芦苇段中部，使其两头对折插入沙内 10~20 cm，露出沙面 15~25 cm，形成 70 cm×120 cm 和 100 cm×110 cm 两种规格的井字形方格，草方格沙障排列方向尽量与主风向夹角大于 45°。这 2 种沙障内的起沙风速可提高至 7~8 和 9~10 m/s^[13]。

(2) 无灌溉生物防沙技术

利用古尔班通古特沙漠悬湿沙层水分，开展植物引种和种植试验，根据土壤水分和植物生物学特性，筛选出梭梭、白梭梭、头状沙拐枣、乔木状沙拐枣、刺沙蓬、沙米等 12 种适宜植物种，建立了适宜古尔班通古特沙漠区域特点的无灌溉植被恢复技术体系^[23-24]，可选择晚秋和早春 2 个时期进行种植，采用植苗和直播两种造林方法，也可辅以保水剂蘸根、客沙改土等处理方式以提高成活率，不同立地条件(填方段阴坡、填方段阳坡、挖方段阴坡、挖方段阳坡)水分状况不同，应相应采取不同的林带结构布局(株行距 2 m×2 m, 2 m×1 m 及 1 m×1 m)。研究发现^[25]，沙拐枣的耗水量是梭梭的 2 倍，特别是成年龄沙拐枣的耗水量较大，大多生长在阴坡、垄沟等集水地带，若土壤水分条件无法满足其生长需求，将导致其枯死。因此，今后人工种植应以梭梭等低耗水耐旱植物为优选物种。

(3) 沙漠明渠立体防沙体系

在工程纵断面上，采用“平台先行，道路紧跟，防护同步”的集中开槽式施工新方法，严格控制施工扰动范围，先期开展草方格机械固沙；在工程横断面上，从上风口，由外向里，依次设立草方格防护带、无灌溉沙生植物防护带、人工绿化带、伴渠公路、缓冲带，形成梯次防风阻沙效果；在垂直方向上，草方格高出沙面高度 15~25 cm，沙生植物 30~120 cm，人工绿化带 120~200 cm，道路路面高出渠道顶部 60~100 cm，层层消减风沙流能量，拦截流沙，有效减少直接入渠风沙量。形成了“机械固沙与生物治沙相结合”、“乔灌草”立体组合、“防风固沙、减速沉沙、阶梯拦沙一体”的多梯度立体综合固沙治沙综合技术体系(见图 3)。

4.4 鼠害防治与生态环境保护

掌握了沿线野生动物的生活习性，设置迁徙通道，保障动物迁徙；结合生物治沙，沿渠道两侧构筑生态景观，改善饮水条件，增加生物多样性；采

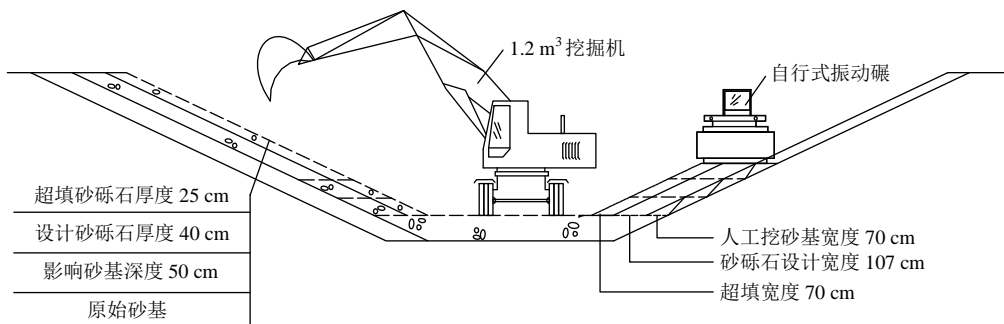


图 5 沙漠明渠水平同起碾压施工工艺示意图

Fig.5 Sketch of roll compaction technology at same level for open canal in desert

用环保生物灭鼠和天敌灭鼠等综合鼠害防治技术，抑制渠道两侧鼠群数量，减少鼠害威胁。

(1) 鼠害防治技术

由于渠道两侧种植防沙林带，导致沙鼠食物充足、繁殖过快，甚至出现沙鼠在渠堤打洞的现象，严重危害渠道安全。针对鼠害问题，采用了综合治理方法。一是采取生物药类治鼠措施，投放从雷公藤植物中制取的新贝奥生物(植物源)灭鼠剂，其具有很好的杀灭和抗生育双重防治效果，可以从根本上降低鼠类的密度和种群数量以及出生率，达到长久的灭鼠效果，同时不会对其他野生动物产生二次毒害^[26]；二是在渠道两侧建立饮水池和鹰墩、鹰架，以吸引狐、黄鼬等食肉小兽以及猎隼、鹰、猫头鹰等猛禽，利用天敌有效控制沙鼠种群数量。

(2) 野生动物通道

卡拉麦里山有蹄类动物自然保护区处于渠道以东 50~100 km。鹅喉羚取水取食距离与水源分布和食物资源丰富度密切相关，活动距离可达 10~15 km，水源需求强烈的季节，迁移距离可达上百公里^[22]。荒漠区域的有蹄类动物对通道视野的开阔度要求较高，国内外相关物种的案例^[21]表明，与桥梁下方的涵洞结构相比，桥梁通道对动物的心理压力小，对各种动物类群都具有较高的利用率。

为了保障鹅喉羚等野生动物的活动路线，渠道沿线建设了跨渠桥作为动物通道，有 25 座钢架桥(桥面宽 4.2 m)和 4 座混凝土桥(桥面宽 8 m)，相邻钢桥间距控制在 10 km 左右，最远不超过 20 km；在桥面铺设 5 cm 厚木板，并在其上覆盖 10 cm 厚的沙土，力求与周围环境保持一致。为了模拟天然环境的野生动物通道，后期又增设 4 座 50 m 宽动物通道，并在渠道沿线及通道两侧建立 40 处引水池。这些措施对于保护野生动物，发挥了十分重要的作用。

(3) 生物多样性

由于沙漠渠道两侧防护林体系的建立，形成了乔-灌-草结合、结构相对稳定的混交植被群落，植物多样性和丰富度明显增加。随着水环境条件的改变，极大地改善了沙漠生境状况，为昆虫、鸟类、小型兽类等野生动物的生存繁衍创造了良好条件，使沙漠渠道两侧自然植被群落和野生动物群落更加繁盛，甚至超越工程建设前的原生自然环境。

5 渠道沉降变形监测

沙漠明渠分别在高填方段(见图 6，最大填高

16 m)和半挖半填段(见图 7)各设置 1 个监测断面，并在渠顶部、左右边坡和渠底各布置了监测点，监测渠坡表面变形。

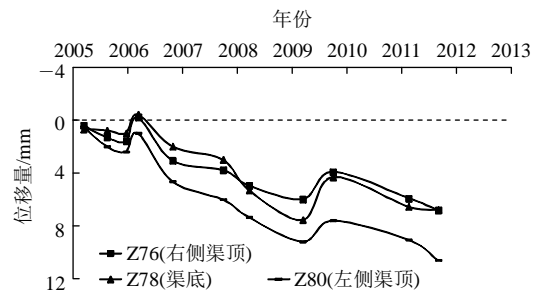


图 6 沙漠明渠高填方断面竖向位移过程线

Fig.6 Vertical displacement curve of high filling section for open canal in desert

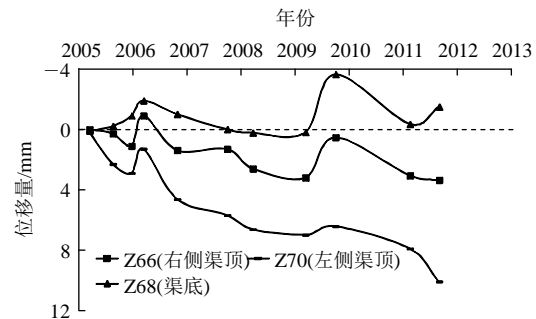


图 7 沙漠明渠半挖半填断面竖向位移过程线

Fig.7 Vertical displacement curve of half-filling and half-excitation section for open canal in desert

断面各测点的累计竖向位移量均很小，累计最大竖向位移量仅为 10.6 mm，最大位移变化量 3.8 mm，各断面左侧渠顶位移较大，渠底位移较小，所有测点累计位移量在 -3.6~10.6 mm 范围。沙漠明渠各监测断面竖向和水平向位移目前尚未最终收敛，但变形增量均很小，需继续加强变形监测。

6 结论

(1) 古尔班通古特沙漠明渠建设形成了成套关键技术与方法，填补国内外沙漠渠道建设的多项技术空白，特别是沙土透水性较好，能有效地将渠道渗水排渗到深层沙基，不会在防渗塑膜后积水或对渠道边坡和底部产生顶托破坏，也避免了冻胀破坏。渠道沉降变形小，无一处发生湿陷、渗透、冻胀或滑动破坏。

(2) 充分利用悬湿沙层，在无灌溉条件下建立了 110 km 植物防沙带，机械固沙与生物治沙相结

合, 形成多梯度防风治沙综合技术体系, 丰富了荒漠植被恢复和风沙危害防治的理论研究与工程实践, 防风固沙效果非常显著。

参考文献(References):

- [1] 姚洪林. 埃及沙漠治理考察报告[J]. 内蒙古林业科技, 1996, 25(1): 1 - 8.(YAO Honglin. Egyptian desert management study report[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 1996, 25(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [2] 于志峰. 利比亚西部管道工程线路设计[J]. 油气储运, 2005, 24(12): 24 - 28.(YU Zhifeng. The pipeline route design on Libya western pipeline project[J]. OGST, 2005, 24(12): 24 - 28.(in Chinese))
- [3] 魏昌林. 以色列北水南调工程[J]. 世界农业, 2001, 23(10): 29 - 30.(WEI Changlin. Israel north water south project[J]. World Agriculture, 2001, 23(10): 29 - 30.(in Chinese))
- [4] 杨立信. 土库曼斯坦列宁 - 卡拉库姆运河调水工程[J]. 水利发展研究, 2002, 2(5): 42 - 45.(YANG Lixin. A brief introduction to the v.i. lenin memorial karakum canal in turkmenistan[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(5): 42 - 45.(in Chinese))
- [5] 李运辉, 陈献耘. 美国加利福尼亚州水道调水工程[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 45 - 48.(LI Yunhui, CHEN Xianyun. California waterway water transfer project[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(9): 45 - 48.(in Chinese))
- [6] 王光谦, 欧阳琪, 魏加华, 等. 世界调水工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 25 - 28.(WANG Guangqian, OUYANG Qi, WEI Jiahua, et al. Water transfer projects in the world[M]. Beijing: Science Press, 2009: 25 - 28.(in Chinese))
- [7] 李运辉, 陈献耘, 沈艳艳. 印度萨达尔萨罗瓦调水工程[J]. 水利发展研究, 2003, 3(5): 49 - 52.(LI Yunhui, CHEN Xianyun, SHEN Yanchen. India sadar salva water transfer project[J]. Water Resources Development Research, 2003, 3(5): 49 - 52.(in Chinese))
- [8] 骆进仁, 张少敏, 钱晓东, 等. 国内外调水工程实践与启示[J]. 兰州交通大学学报, 2011, 30(5): 104 - 107.(LUO Jinren, ZHANG Shaomin, QIAN Xiaodong, et al. Practice and enlightenment of trans-water project at home and abroad[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2011, 30(5): 104 - 107.(in Chinese))
- [9] 魏文寿, 刘明哲. 古尔班通古特沙漠现代沙漠环境与气候变化[J]. 中国沙漠, 2000, 20(2): 178 - 184.(WEI Wenshou, LIU Mingzhe. Modern desert environment and climate change—a case study in Gurbantunggut desert[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(2): 178 - 184.(in Chinese))
- [10] 张元明, 潘惠霞, 潘伯荣. 古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 61 - 64.(ZHANG Yuanming, PAN Huixia, PAN Borong. Distribution characteristics of biological crust on sand dune surface in Gurbantunggut desert, Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 61 - 64.(in Chinese))
- [11] 范连连, 马健, 吴林峰, 等. 古尔班通古特沙漠南缘草本层对积雪变化的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 126 - 135.(FAN Lianlian, MA Jian, WU Linfeng, et al. Response of the herbaceous layer to snow variability at the south margin of the Gurbantunggut desert of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(2): 126 - 135.(in Chinese))
- [12] 王新军, 赵成义, 杨瑞红, 等. 古尔班通古特沙漠南缘荒漠化过程演变的景观格局特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1 213 - 1 225.(WANG Xinjun, ZHAO Chengyi, YANG Ruihong, et al. Landscape pattern characteristics of desertification evolution in southern Gurbantunggut desert[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1 213 - 1 225.(in Chinese))
- [13] 王雪芹, 张元明, 张伟民, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮对地表风蚀作用影响的风洞实验[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 632 - 638.(WANG Xueqin, ZHANG Yuanming, ZHANG Weiming, et al. Wind tunnel experiment of biological crust effect on wind erodibility of sand surface in Gurbantunggut desert, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5): 632 - 638.(in Chinese))
- [14] 王恒元. 沙漠输水箱型暗渠混凝土裂缝成因分析[J]. 水利建设与管理, 2011, 23(8): 52 - 56.(WANG Hengyuan. Analysis on the cause of concrete crack in box-structure desert underground canal of water delivery[J]. Water Resources Development and Management, 2011, 23(8): 52 - 56.(in Chinese))
- [15] 贾聿卿, 李志农, 金昌宁, 等. 风积沙路基回弹模量与压实度、含水量的关系研究[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(1): 88 - 94.(JIA Yuqing, LI Zhinong, JIN Changning, et al. Study on relations between rebound modules, compactedness and moisture content of aeolian sand roadbed[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(1): 88 - 94.(in Chinese))
- [16] 胡德夫, 贾泽信. 古尔班通古特沙漠南缘脊椎动物群落的摄食集团及其生态适应[J]. 干旱区研究, 1998, 15(1): 64 - 68.(HU Defu, JIA Zexin. Feeding guilds of vertebrate community with some ecological adaptation in south fringe of Dzungaria sandy desert[J]. Arid Zone Research, 1998, 15(1): 64 - 68.(in Chinese))
- [17] 张立德, 王远超, 周小兵, 等. 沙漠明渠工程设计施工关键技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 32 -

- 39.(ZHANG Lide, WANG Yuanchao, ZHOU Xiaobing, et al. Practice and study on key techniques of design and construction for open desert canal[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005: 32 - 39.(in Chinese))
- [18] 熊玲. 新疆草原鼠害综合防治技术应用[J]. 新疆畜牧业, 2011, 27(6): 58 - 60.(XIONG Ling. Application of integrated control technology of rodents in Xinjiang grassland[J]. Xinjiang Animal Husbandry, 2011, 27(6): 58 - 60.(in Chinese))
- [19] 张晏, 费世江. 公路建设中野生动物通道的设置研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2009, 32(1): 93 - 98.(ZHANG Yan, FEI Shijiang. Study on wildlife passage in highway construction[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2009, 32(1): 93 - 98.(in Chinese))
- [20] 万金平, 王远超, 刘晓鹏. 沙漠渠道防风固沙和生态环境建设研究与实践[J]. 水利建设与管理, 2005, 25(2): 29 - 32.(WAN Jinping, WANG Yuanchao, LIU Xiaopeng. Practice and study on wind-prevention and sand-fixation and ecological protection of desert canal[J]. Water Resources Development and Management, 2005, 25(2): 29 - 32.(in Chinese))
- [21] 王远超, 万金平, 刘晓鹏, 等. 沙漠渠道渠床加固处理[J]. 水利建设与管理, 2005, 25(1): 34 - 39.(WANG Yuanchao, WAN Jinping, LIU Xiaopeng, et al. Desert canal bed reinforcement[J]. Water Resources Development and Management, 2005, 25(1): 34 - 39.(in Chinese))
- [22] 李莹, 徐文轩, 乔建芳, 等. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚的时空分布与生境选择[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 261 - 267.(LI Ying, XU Wenxuan, QIAO Jianfang, et al. Spatio-temporal distribution and habitat selection of gazella subgutturosa in Kalamaili mountain nature reserve in four seasons[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(2): 261 - 267.(in Chinese))
- [23] 蒋进, 王雪芹, 雷加强. 古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 74 - 76.(JIANG Jin, WANG Xueqin, LEI Jiaqiang. Soil moisture distribution in straw barrier system in Gurbantonggut desert of Xinjiang, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 74 - 76.(in Chinese))
- [24] 赵从举, 康慕谊, 雷加强. 古尔班通古特沙漠腹地土壤水分时空分异研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 158 - 161.(ZHAO Congju, KANG Muyi, LEI Jiaqiang. Space-time distribution of soil moisture in hinter land of Gurbantonggut desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 158 - 161.(in Chinese))
- [25] 赵从举, 康慕谊, 雷加强. 准噶尔盆地典型地段植物群落及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2669 - 2677.(ZHAO Congju, KANG Muyi, LEI Jiaqiang. Relationships between plant community characteristics and environmental factors in the typical profiles from Dzungaria basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(10): 2669 - 2677.(in Chinese))
- [26] 沙依拉吾, 阿帕尔, 徐光青, 等. 三角翼轻型飞机撒饵防治草原害鼠初步实验[J]. 新疆畜牧业, 2013, 29(9): 62 - 64.(Sayilawu, Aparer, XU Guangqing, et al. Preliminary experiments on harmful rodent control on the grassland spreading baits by micro-light delta-winged aircraft[J]. Xinjiang Husbandry, 2013, 29(9): 62 - 64.(in Chinese))