



塔里木沙漠公路防护林生态工程的综合生态环境效应

雷加强, 李生宇, 靳正忠, 范敬龙, 王海峰, 范冬冬, 周宏伟, 谷峰, 邱永志, 许波

中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

中国科学院研究生院, 北京 100049;

中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 库尔勒 841000

E-mail: desert@ms.xjb.ac.cn

2008-08-07 收稿, 2008-09-01 接受

中国科学院重要方向项目(编号: KZCX3-SW-342)、新疆维吾尔自治区重大科技专项(编号: 200733144-3)、国家自然科学基金项目(批准号: 40701019, 40701098)、中国科学院西部行动计划项目(编号: KZCX2-XB2-13)、中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(编号: 20052118)和中国科学院新疆生态与地理研究所绿洲学者“博士人才”计划项目资助

摘要 为了探讨重大工程的生态环境效应, 从风沙环境、土壤环境、小气候、生物多样性和地下水环境5个方面对塔里木沙漠公路防护林工程的综合生态环境效应进行了研究。结果表明: (1) 防护林改变了近地表风沙运动过程, 防沙体系内风速、输沙率降低幅度分别达64%~80%和87.45%~99.02%, 风沙流结构、沙物质粒度、地表蚀积状况也发生了明显变化; (2) 与自然流沙地相比, 防护林土壤容重减小, 全盐含量、总孔隙度和含水量增大, 土壤肥力质量明显提高, 其变化基本呈现“先快后慢”的规律; (3) 防护林对于小环境改善作用明显, 距地面6 m范围内, 林地不同高度的空气温度普遍低于自然流沙地, 而空气湿度则高于自然流沙地, 林地土壤温度也低于自然流沙地; (4) 随着防护林内生境的变化, 土壤微生物种类显著增加, 但不同种类微生物的种群分布并不均匀; (5) 目前防护林灌溉抽水对地下水位、地下水矿化度的影响不大, 水位在厘米级范围波动, 矿化度的变化幅度在 $\pm 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 且没有明显的变化趋势。

关键词

沙漠
防护林工程
环境效应
风沙环境
生物多样性

工程建设对地球环境影响强度高、速度快、范围广。一般认为矿产开发和工业加工、水利工程、交通工程等对生态环境的负面效应较多, 而生态恢复重建和灾害防治工程则对生态环境的正面效应较多。国内外关于沙漠地区植树造林的生态环境效益研究不多^[1], 国内对宁夏中卫沙坡头铁路防护体系效益研究较多^[2-8], 而对于极端干旱流动沙漠区防沙体系环境效益的全面分析报道则很少。

塔里木沙漠公路防护林生态工程纵贯塔克拉玛干沙漠, 全长466 km, 宽约72~78 m, 是沙漠公路防护的屏障, 同时也改变了局地生态环境。以往报道发现, 这种环境效应是多方面的, 主要包括风沙运动、土壤性质、小气候和地下水环境等变化^[9-12]。前人多注重单因素研究, 而缺乏综合性。本文围绕塔里

木沙漠公路防护林体系, 考虑大气、生物、土壤、地下水, 综合分析防护林建设后各种环境因子的变化特征, 系统揭示塔里木沙漠公路防护林工程的生态环境效应。该研究对于干旱区生态恢复与重建技术方案制定和环境评价也有借鉴作用。

1 研究区域背景

1.1 自然条件

塔里木沙漠公路沙漠段介于 $37^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$ 和 $82^{\circ} \sim 85^{\circ} \text{E}$ 之间, 基本沿 84°E 呈南北向穿越塔克拉玛干沙漠。塔克拉玛干沙漠是世界第二大流动沙漠, 面积 $33.78 \times 10^4 \text{ km}^2$, 82%的面积被流动沙丘覆盖。气候干旱少雨, 是欧亚大陆的干旱中心。沙漠沙丘类型复杂多样, 形态各异, 被誉为“世界沙丘的博物馆”。

沙漠中鲜有动植物分布,被称之为“死亡之海”。沙漠公路沿线降水稀少、风动力强劲、风沙地貌类型多样、沙源丰富、土壤贫瘠、植物稀少、地表径流匮乏,对公路的安全运行造成了巨大威胁。

据塔里木沙漠公路沿线各气象站观测资料^[13],沙漠腹地年降水量为 10.7 mm,年蒸发量为 3806.4 mm,年平均气温为 12.7℃,极端最高和最低气温为 43.2℃ 和 -19.3℃,年日照时数为 2854.2 h,最大冻土深度为 88 cm,大风日数为 6 d·a⁻¹,浮尘日数为 74 d·a⁻¹,扬沙日数为 45 d·a⁻¹,3月至9月为风季,10月至翌年2月为静风季。公路沿线风动力条件存在一定的空间差异,在沙漠公路北端的肖塘,以北、北北东、北东、北东东、东等风向为主,合成风向为北北东;在沙漠公路中部的塔中,主风向以北东东、北东和北北东为主;在沙漠公路南段,风向多变,同时受东北、西北、西南3个方向风的影响,但年起沙风次数明显低于肖塘和塔中。

塔里木沙漠公路沿线缺乏地表径流,但地下水储量较大。据估算^[13],沙漠公路沿线地下水基础储量为 16.29×10⁸ m³,年动态补给量为 9671.0~9931.0×10⁴ m³。地下水埋深随地形地貌变化较大,垄间地下水埋深在 5 m 以下,垄顶在 20 m 以上。沙漠公路沿线地下水水质自北而南存在空间差异,大部分路段地下水矿化度多在 3~5 g·L⁻¹,最大可达 30 g·L⁻¹,水化学类型以 ClSO₄-Na 为主。

塔里木沙漠公路沿线土壤类型极为简单,以形成过程极为微弱的风沙土为主体,土壤质地较粗,结构松散,物理性黏粒很少,生物作用微弱,有机质积累很少,石灰质含量较高,其中流动风沙土有机质含量小于 1%,盐分含量不超过 2%,pH 为 9 左右,土壤水分含量不足 0.5%,所以难以滋养植物生长。沿线动植物种类组成简单,数量极少,共有动物 5 种,即蜘蛛(Araneida)、塔里木兔(Lepus yarkandensis)、毛脚跳鼠(Dipus sagitta)、子午沙鼠(Meriones meridianus)及野骆驼(Camelus bactrianus)等;共有植物 19 种,分属 8 个科,其中包括塔克拉玛干柽柳(T. taklamakanensis P.Y.Zhang. et M.T.Liu)、芦苇(Phragmites communis)、鹿角草(Bidens parviflora Willd.)、沙拐枣(Calligonum mongolicum Tur cz.)、小花天芥菜(Heliotropium micranthum (Pall.)Bge)等^[13]。

1.2 工程条件

由于塔里木公路沿线环境条件特殊,防护林生

态工程选用耐盐、耐旱、耐寒、耐高温、耐风蚀和沙埋的沙拐枣(Calligonum L.)、柽柳(Tamarix L.)和梭梭(Haloxyylon Bge.)三属优良固沙灌木树种,在高大沙丘区以沙拐枣、梭梭为主,垄间以柽柳属为主,而在地下水位较浅的路段选用刚毛柽柳(Tamarix hispida Willd.)、长穗柽柳(Tamarix elongata Ledeb.)等耐盐能力强的柽柳属树种^[14]。

综合考虑塔里木公路防护林生态工程的防护效益、稳定性及景观效益,阻沙林带结构采用带状混交配置,株、行距分别为 1 m×2 m 和 1 m×1 m,固沙林带结构采用行间混交,株、行距为 1 m×2 m,固沙林带靠近路边的两行为柽柳,株、行距为 1 m×1 m。

塔里木公路沿线地形复杂破碎,蒸发作用强烈,灌溉所用的地下水矿化度高,不宜于采用畦灌、沟灌和喷灌。滴灌为点源灌溉,地形适应能力强,灌溉强度小,蒸发、渗漏等无效损耗少,灌溉效率高,节约水资源^[13,15,16]。因此,塔里木公路防护林生态工程就地采用高矿化度地下水进行滴灌。

2 研究方法

2.1 风沙环境效应

风动力观测采用 DET 型可移动测风梯度站(长春气象仪器研究所生产),输沙率观测采用阶梯式集沙仪,沙面蚀积观测采用插钎法,沙丘形态和移动观测采用全站仪(NTS-352),大气降尘采用降尘缸干式收集法^[17]。降尘缸上口距地面 1.5 m,沙物质粒度分析采用激光粒度仪(Marven 2000),采用福克-沃德(Folk and Ward)粒度统计参数^[18]。

2.2 土壤环境效应

土壤水溶性盐含量用残渣烘干法测定,pH 用电位测定法测定,土壤含水量用烘干法测定,容重用环刀法测定,比重用比重瓶法测定,总孔隙度由容重和比重计算得出。

土壤肥力测试因子包括可溶性盐、有机质、N、P 和 K 全量、速效 N、P 和 K,其中有机质用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全 N 用高氯酸-硫酸消化法测定;有效 N 用碱解蒸馏法测定;全 P 用酸溶-钼锑抗比色法测定;有效 P 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法测定;全 K 用酸溶-火焰光度法测定;速效 K 用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。土壤肥力计算选择连续性质的隶属度函数,土壤肥力的综合指标值 $IFI = \sum W_i \cdot F_i$ (W_i 表示各肥力因子的权重向量, F_i 表示

各肥力因子的隶属度值)^[19]。

2.3 小气候效应

大气温度和湿度监测采用 HOBO 温湿度探头 (HOBO Pro HR/Temp, 美国 ONSET 公司生产), 分别架设在距地表不同高度, 土壤温度监测采用 HOBO 土壤温度探头 (HOBO H8 Water/Soil Temp, 数采 Outdoor/ Industrial 4-Channel External Logger, 美国 ONSET 公司生产), 分别埋设在距地面不同深度。

2.4 生物多样性效应

土壤微生物脂肪酸分析采用 FAME 法 (Fatty acid methyl esters)^[20,21], 土壤细菌多样性采用 PCR-DGGE (Polymerase chain reaction-deraturing gradient-gel electrophoresis) 分析, 细菌脂肪酸和 DNA 片段的多样性用多样性指数 (H)、丰度 (S) 和均匀度 (E_H) 来表示, 计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i = - \sum_{i=1}^S (N_i / N) \ln (N_i / N), \quad (1)$$

$$E_H = H / H_{\max} = H / \ln S, \quad (2)$$

其中, P_i 是特殊脂肪酸占总脂肪酸量的百分数或者单一条带的强度在所有条带总强度中所占的比率, S 是从某个土壤样品中所有脂肪酸或者 DNA 条带数目总和。

2.5 地下水环境效应

地下水位采用皮尺和水位测定简易装置 (电流表外接长导线) 测定, 地下水矿化度采用残渣烘干法测定, 电导率采用 DDB-303A 型便携式电导率仪测定, pH 采用雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定; 碳酸根和碳酸氢根用双指示剂中和法的测定, 钙、镁和硫酸根离子用 EDTA 络合滴定法测定, 氯离子用 $AgNO_3$ 滴定法测定,

钾和钠用火焰光度法测定, 钾和钠含量用差减法测定。

3 结果与分析

3.1 风沙环境效应

() 风动力和输沙率变化。 垄间平沙地观测结果表明, 当防沙林带外流动沙面 1 m 高 5 min 平均风速为 $6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 地表 20 cm 高度范围内的输沙率为 $0.51 \text{ g} \cdot (\text{min} \cdot \text{cm})^{-1}$ 时, 而在防沙林带内部, 风速降至 $1.5 \sim 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为原始地面的 22.73%~50%, 输沙率也降至 $0.005 \sim 0.064 \text{ g} \cdot (\text{min} \cdot \text{cm})^{-1}$, 仅为原始地面的 0.98%~12.55%, 其中在固沙林带中部, 输沙率降至最低, 较对照降低了 99.02%。 虽然风速在林间空地有所恢复增加, 但当进入林带内风速继续降低, 降低幅度达 64%~80% (图 1)。

() 风沙流结构变化。 对垄间平沙地林带内外各点 (图 1) 的风沙流结构同步观测表明, S1~S5 点的风沙流结构都遵循 “高度增加、含沙量下降” 的一般分布规律, 但是防沙体系内外的风沙流结构存在明显差异 (图 2): 各点 2~4 cm 的相对含沙量相差不大; 0~4 cm 层, 防沙体系内各点 (S2~S5) 相对含沙量都小于 65%, 而流沙地 (S1) 达到 78%; 6~20 cm 层, 流沙地的相对含沙量仅为 17%, 而防沙体系内各点达到 32%~64%。 因此, 在流沙地风沙流沙粒浓度随高度下降速度很快, 而在防沙体系内则下降缓慢, 且上层含沙量分布都趋于均匀。 可见由于下层沙物质的卸载, 防沙体系内上层含沙量相对增加。 刘千枝^[22]和张华等人^[23]研究也发现了这一现象。 因此随着防沙林带内近地表风速被极大削弱, 沙物质多随气流以跃移和悬移的形式进入防沙林带, 且主要分布在上层。

() 沙物质粒度变化。 采样分析发现, 垄间阻

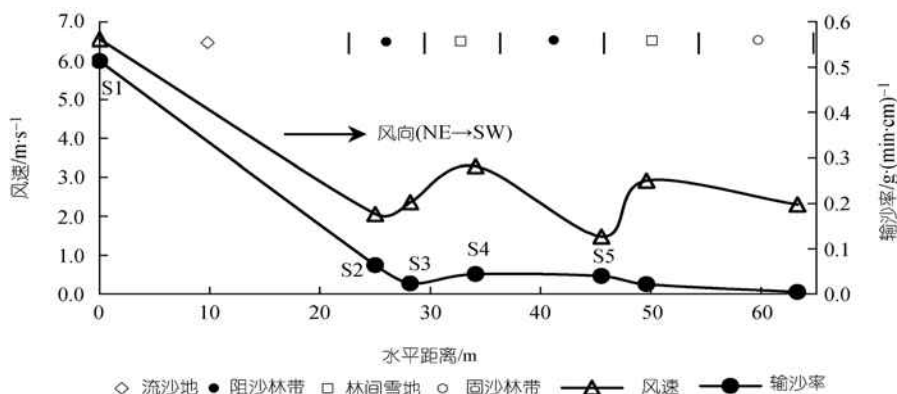


图 1 垄间防沙林带内外各点距地面 1 m 高度风速和地表 20 cm 高度范围内输沙率对比

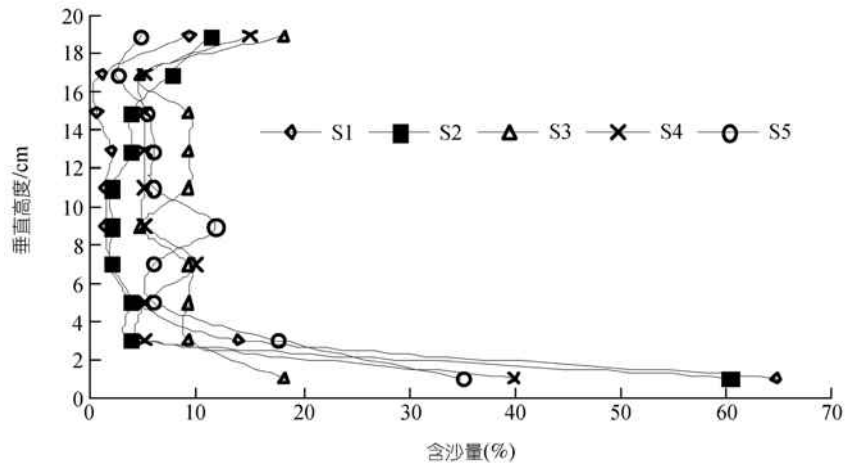


图2 垄间防沙林带内外各点风沙流结构变化(S1~S5的位置请参见图1)

沙林带中部、固沙林带中部和林间由于沙面积沙量较少,沙物质粒度组成与原始粗沙地非常接近,但都不含粗沙成分,极细沙和粉沙含量都增加,平均含量分别增加了3.90%和4.85%,而细沙和中沙含量略降低,平均含量分别降低了0.66%和0.37%,平均粒径(3.493)降低。林带中3个点和林带外流动沙丘顶部的分选性都较好,但前者大于后者,而丘间平沙地的分选性中等。因此,林带中3个点的分选性较原始小沙丘差,而较垄间平沙地好。林带中各点和林带外流动沙丘顶部的粒度曲线近对称分布,峰态中等,而垄间平沙地粒度曲线负偏、峰态很窄(表1)。可见,由于林带对近地表风动力的极大削弱,只有细粒成分可在林带中沉积。降尘采样分析也表明,与流动沙丘顶部沙样相比,林带大气降尘与表层结皮粒度分布曲线细偏,含有一个细尾,中位数和平均粒径的值都偏大,即偏细,林地降尘和结皮层沙物质粒度分布曲线比较相近,表明林地表层沉积多属于大气降尘堆积。

除强沙尘暴天气有轻微的路面积沙外,一般风沙天气基本不形成路肩、路面大量积沙和沙丘移动上路现象,保证了公路的安全畅通。

()地表形态变化。在防沙体系内部以风积地貌为主,形成了小尺度的灌丛积沙堆、中尺度的片状积沙和较大尺度的垄状积沙体。在防沙体系内的林间也一定程度地形成了风蚀地貌,但在垄间地一般难以大规模发育,而在地形起伏的沙垄区的次级沙丘迎风坡中,则可较大规模地发育。在防沙体系的上风侧,阻沙林带及其形成的垄状积沙体使垄间的低矮流动沙丘在移动过程中发生形态和走向变化。阻沙林带垄状积沙体迎风坡形成稳定积沙坡面,但前移沙丘可造成其短时间的破坏,而后逐渐恢复成稳定坡面。在防沙体系下风侧沙面,可形成较大范围的风蚀,在垄间地形成风蚀凹地,在地形起伏区沙丘被风蚀削平,地形起伏度降低。因此,防沙林带对上风侧风沙流具有巨大的消能截沙作用,到下风侧随着风力的逐渐恢复,风沙流逐渐趋于不饱和,造成沙面风蚀^[24]。

表1 生物防沙体系内外沙面颗粒级配(%)和粒度参数

位置	颗粒级配/mm					粒度参数					
	>0.5 (粗沙)	0.5~0.25 (中沙)	0.25~0.125 (细沙)	0.125~0.063 (极细沙)	0.063~0.005 (粉沙)	M _d () 平均粒径	M _d /mm	S _k 分选	S _k 偏度	K _G 峰态	
林带外	沙丘顶部	0	4.61	46.37	45.43	3.59	2.968	0.128	0.587	-0.009	0.947
	丘间平地	7.72	0.44	21.07	54.38	16.38	3.331	0.099	0.943	-0.273	1.820
	阻沙林带	0	0.04	19.25	58.34	22.36	3.517	0.087	0.603	0.033	0.975
林带中	林间空地	0	0.11	22.68	58.32	18.89	3.444	0.092	0.599	0.029	0.971
	固沙林带	0	0.06	19.31	58.18	22.44	3.517	0.087	0.607	0.035	0.979
	林地结皮	0	0.12	21.64	56.87	21.38	3.483	0.089	0.637	0.065	1.021
	林地降尘	0	0	28.97	60.41	10.62	3.296	0.102	0.538	0.034	0.973

3.2 土壤环境效应

() 土壤水盐含量和质地的变化. 与流沙地相比(表 2), 林地土壤容重减小, 全盐含量、总孔隙度和含水量增大, 说明防护林建设后土壤通透性变好, 质地趋于疏松, 但盐分有积累现象. 多重比较发现, 不同林龄的林地之间土壤容重均在 0.05 水平上差异显著, 而总孔隙度、全盐和含水量同样达到显著差异.

林地结皮层全盐含量很高, 为流沙地 0~5 cm 层的 17.6~58 倍, 林地 0~5 和 5~15 cm 层的盐分含量基本都大于流沙地, 而 15~30 cm 层盐分含量都小于流沙地, 表明 15 cm 以上各层受盐分表聚作用强烈, 而下层受灌水平溶作用明显. 不同林龄土壤的结皮层盐分含量变化规律明显, 林地建立初期盐分表聚作用强烈, 随着林龄的增加, 表层盐分含量逐渐下降至某一稳定水平, 而结皮层以下各层盐分含量变化不明显. 流沙地上下各层都为氯盐, 且以 NaCl 为主, 其次为 CaCl₂, KCl 和 MgCl₂, 而林地土壤上下各层除氯盐外, 还含有大量的硫酸盐, 部分样品中还含有一定量的碳酸盐, 多数样品以钠盐为主, 部分样品以钙盐为主.

() 土壤肥力的变化. 在林地土壤垂直剖面中, 从下层到表层, 有机质、全 N 和全 P 都呈逐渐增加趋势, 尤其是结皮层增加幅度最大, 全 K 在土壤剖面中变化规律不明显. 随着林龄的增加, 林地土壤各层的有机质、全 N 含量都呈增加趋势, 其中在 15 cm 以上各层全 P 和全 K 含量随林龄呈增加趋势, 但结皮层的全 P 和全 K 含量随林龄增加呈降低趋势, 在 15~30 cm 层全 P 呈下降趋势, 全 K 变化趋势不明显.

计算表明, 塔里木沙漠公路防护林地建设后, 土壤肥力质量明显提高(图 3). 流沙地土壤综合肥力指数(IFI)仅为 0.115, 12 年防护林地土壤肥力指数达到 0.885. 可见流沙地上建设防护林绿地后, 土壤肥力的变化基本呈现“先快后慢”的规律^[25].

3.3 小气候效应

() 空气距地表温度和湿度变化. 2006 年 7 月下旬, 观测了流沙地和林地 2, 6 和 8 m 高度的空气温度和相对湿度, 数据表明流沙地不同高度的空气温度普遍高于林地, 而空气相对湿度则表现为林地高于流沙地(表 3). 由多重比较看出, 流沙地与林地 2 和 6 m 高度的空气温度差异显著, 而 8 m 高度处的空气相对湿度则差异不明显. 就空气相对湿度而言, 呈现出与温度类似的变化规律, 即流沙地与林地在 2 和 6 m 高度差异明显, 在 8 m 高度处无明显差异, 说明随着高度的增加, 防护林地对空气温度和相对湿度的影响愈小^[26].

() 土壤温度变化. 2006 年 7 月下旬, 观测了流沙地和林地不同深度(5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 和 100 cm)的土壤温度, 采用多重比较分析了林地和流沙地不同深度土壤温度的差异, 结果发现(表 4), 在同一深度上, 林地土壤温度明显低于流沙地, 在 8 个观测深度上, 两者之间的差异达到显著水平; 在林地和流沙地, 随着深度的增大土壤温度均降低, 但流沙地在 5~100 cm 深度范围内温度变幅明显大于林地, 这表明防护林对土壤温度有调节作用. 防护林对土壤的降温作用一方面是由于林地灌溉土壤含水量增加, 土壤比热相应增加, 导致温度变化幅度小, 另一方面与林带对太阳辐射的吸收和反射作用有关, 导致林地地面辐射降低.

3.4 生物多样性效应

() 林下动植物多样性变化. 塔里木沙漠公路防护林地建设后, 植物种类增加, 2006 年 9 月对沙漠公路沿线林下物种进行了样方(20 m×20 m)调查, 发现林地中出现河西菊(*Hexinia polydichotoma*)、盐生草(*Halogeton glomeratus* Moq)、芦苇(*Phragmites aus tralis* Trin.et Steud)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica* Iljin)、

表 2 不同林龄防护林土壤主要理化性质变化^{a)}

林龄/a	容重/g·cm ⁻³	总孔隙度(%)	含水量(%)	全盐/g·kg ⁻¹
0	1.94 a	33.6 a	0.61 a	0.47 a
1	1.81 b	35.28 b	1.82 b	0.77 ab
2	1.73 c	37.89 c	2.12 c	0.94 b
3	1.67 d	39.69 d	2.55 d	1.17 b
4	1.63 e	40.39 d	3.05 de	1.62 c
6	1.57 f	42.30 e	4.72 ef	1.92 c
8	1.40 g	48.02 f	7.21 f	2.65 d
12	1.28 h	50.38 g	9.09 g	3.49 e

a) 表中各数值为土层 0~10, 10~20 和 20~35 cm 的平均值; 数值后面的英文小写字母表示多重比较的结果, 如果不相同, 则表明两处理之间在 0.05 水平上差异显著, 反之则差异不显著(下同)

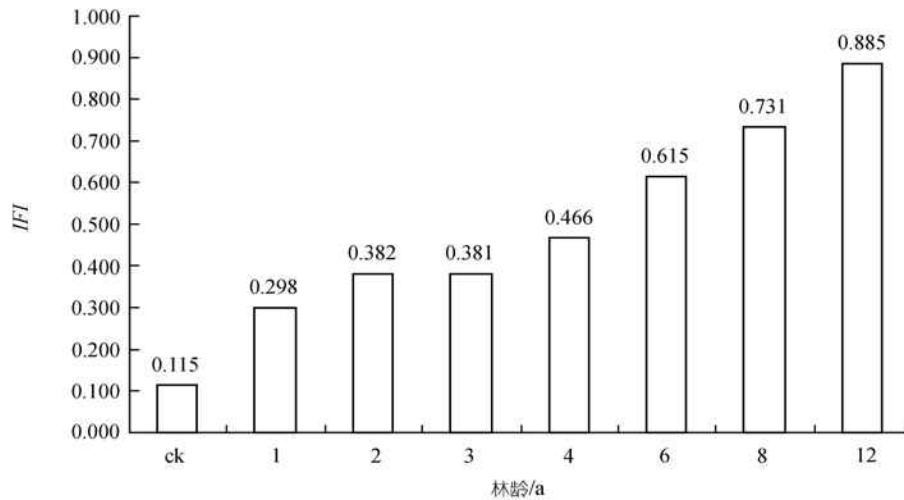


图3 沙漠公路防沙林带土壤肥力随林龄的变化

表3 林地内外不同高度空气温度和相对湿度的变化

位置	温度均值/	相对湿度均值(%)	位置	温度均值/	相对湿度均值(%)
流沙	2 m	30.88 ± 0.66 a	林地	2 m	30.17 ± 0.96 c
	6 m	30.87 ± 0.51 a		6 m	30.62 ± 0.69 b
	8 m	30.75 ± 0.47 ab		8 m	30.70 ± 0.57 ab
		15.38 ± 0.70 d			16.47 ± 0.22 c
		16.90 ± 0.37 c			17.85 ± 0.73 b
		16.75 ± 0.24 c			21.07 ± 0.12 a

表4 不同深度土壤温度变化

深度/cm	流沙地均值/	林地均值/
5	32.47 ± 0.08 a	29.97 ± 0.00 c
10	31.46 ± 0.97 b	28.96 ± 0.58 de
15	31.06 ± 0.06 b	28.35 ± 0.05 e
20	30.82 ± 0.48 b	28.25 ± 0.85 e
40	29.72 ± 0.49 cd	27.31 ± 0.42 f
60	28.37 ± 0.28 e	26.27 ± 0.24 g
80	26.90 ± 0.19 fg	25.32 ± 0.18 h
100	25.28 ± 0.16 h	24.32 ± 0.15 i

罗布麻(*Apocymum venetum*)等草本植物,其中以盐生草和芦苇居多,另外还有少数梭梭和沙拐枣实生苗出现;林带内也出现了象征土壤动物活动的蚁穴、鼠穴、兔穴和蜥蜴穴,其中蚁穴在各调查点均分布广泛,蜥蜴穴和鼠穴次之(表5)。可见,防护林营建对于区域小环境改善作用明显,各种生物在其中定居或者活动,其中出现的这些生物种多为自然生境中的植物种,部分为人为活动带入的生物种。

() 林下土壤微生物多样性变化。(1)微生物脂肪酸多样性变化。不同种类土壤微生物有不同的特征脂肪酸,分析土壤微生物脂肪酸的多样性指数能够反映土壤中微生物种群的多样性大小。通过F检验发现,塔里木沙漠公路不同定植年限防护林地土壤微生物脂肪酸的多样性指数 Shannon diversity(H)、

丰富度 Richness(S)和均匀度 Evenness(E_H)差异明显(表6),其中多样性指数和均匀度的差异达到了极显著水平。多重比较发现,流沙地上建设防护林后,随着林龄的增大,土壤微生物脂肪酸多样性指数逐渐增大,但最大值出现在8年的林地上,12年林地小于6年和8年林地,防护林地定植3年后,土壤脂肪酸多样性指数与流沙地的差异达到显著。随着防护林生长年限的增加,土壤微生物脂肪酸的丰富度明显增大,但均匀度并未增大,甚至有不明显的减小趋势。这表明,流沙地建设防护林后土壤微生物种类显著增加,但不同种类微生物的种群分布并不均匀。(2)细菌基因多样性变化。以往研究表明,塔里木沙漠公路防护林地土壤微生物包括真菌、放线菌和细菌,但以细菌为主^[27]。测试分析表明,随着塔里木沙漠公路防护林定植年限的增大,林地土壤细菌DNA序列的多样性指数明显提高,经F检验在0.01水平上达到显著(表7)。多重比较发现,当防护林定植1年后,林地土壤细菌DNA序列多样性指数有明显提高,定植2年后在0.01的显著水平上差异明显,说明防护林建设对土壤细菌DNA序列的多样性有明显促进作用。另外,不同林龄防护林地土壤细菌基因丰富度指数S(表示土壤中检测到的细菌DNA片段条带数目)变化在2.00~11.67之间,各林地之间有差异明显,其关系

表 5 防护林内植物和动物多样性(单位: 株)

地点	鹿角草	盐生草	芦苇	刺沙蓬	罗布麻	梭梭苗	沙拐枣苗	蚁穴	鼠洞	兔洞	蜥蜴穴
K290.70	628	69	91	4	0	0	0	96	4	0	63
K269.35	0	93	2	14	139	1	0	1066	24	0	46
K218.70	106	392	287	24	0	78	7	426	5	2	16
K224.40	0	4	636	0	0	0	0	107	11	8	13
K248.80	21	0	0	0	0	12	2	58	2	0	12
K182.20	74	68	0	0	0	0	0	2874	0	0	0

表 6 不同林龄防护林内土壤微生物脂肪酸多样性^{a)}

林龄/a	多样性指数(H)	丰富度指数(S)	均匀度指数(E _H)
0	1.92 ±0.05 a	13.33 ±0.58 abc	0.81 ±0.06 abc
1	2.27 ±0.23 ab	19.33 ±1.08 ab	0.84 ±0.03 ab
2	2.34 ±0.24 abc	27.67 ±1.43 a	0.85 ±0.06 a
3	2.38 ±0.21 bcd	27.67 ±1.22 abcd	0.78 ±0.05 abc
4	2.58 ±0.44 cde	29.00 ±1.86 bcd	0.77 ±0.03 bc
6	3.07 ±0.37 de	36.33 ±3.04 bcd	0.77 ±0.03 bc
8	3.12 ±0.23 e	45.67 ±3.33 cd	0.74 ±0.03 c
12	2.84 ±0.42 cde	47.00 ±5.39 d	0.67 ±0.02 d
F 值	5.98**	3.74*	5.83**

a) *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著(下同)

表 7 不同林龄防护林内土壤细菌基因多样性^{a)}

林龄/a	多样性指数(H)	丰富度指数(S)	均匀度指数(E _H)
0	2.26 ±0.07 aA	11.67 ±0.58 aA	0.92 ±0.04 aA
1	2.28 ±0.11 aA	11.00 ±1.00 abA	0.95 ±0.02 aA
2	2.24 ±0.16 aA	10.67 ±0.58 bA	0.93 ±0.03 aA
3	1.56 ±0.24 bB	5.67 ±1.53 cB	0.92 ±0.03 aA
4	1.30 ±0.05 cBC	4.33 ±0.58 dC	0.90 ±0.10 aA
6	1.17 ±0.15 cCD	3.67 ±0.58 dCD	0.91 ±0.12 aA
8	0.90 ±0.27 dDE	2.67 ±0.58 eDE	0.92 ±0.07 aA
12	0.65 ±0.03 eE	2.00 ±0.00 eE	0.94 ±0.05 aA
F 值	74.36**	197.83**	0.19

a) 数值后面的大写字母表示多重比较的结果, 如果相同, 则表示处理之间在 0.01 水平上差异不显著; 反之, 则差异显著

与多样性指数 H 较为相似, 但均匀度指数 E_H 在不同林地间的差异不明显, 表明片段大小不同的土壤细菌 DNA 序列在林地土壤的含量大小无明显差异. 由此可见, 塔里木沙漠公路防护林地建设后土壤微生物种类明显增多, 随着林龄的增大, 土壤微生物多样性指数提高.

3.5 地下水环境效应

() 地下水埋深对抽水的响应. 灌溉水源井开采深度均在 120 m 之内, 单位出水量约 30 m³ ·h⁻¹. 从

第 69 号水源井抽水引起的周边观测井(图 4)地下水埋深变化过程可以看出, 埋深上升或下降过程均可分为加速和减速两个阶段. 将观测井中所测埋深降深值减去其初始值, 既得到埋深降深的变化值, 它与持续抽水时间的关系如图 5 所示. 1~24 号观测井地下水埋深下降过程曲线都具有相似的形状, 分析可知抽水过程中埋深下降阶段性明显, 开始抽水时刻, 潜水面下降速度较快, 在经历一个快速下降过程后转为下降速度较为缓慢的过程, 降深-时间曲线的斜率减小, 最后趋于一个稳定的埋深降深值, 直至抽水结束, 埋深下降速度明显减缓. 将观测井中所测得的恢复埋深减去其初始值, 即得到埋深恢复的变化值, 它与埋深持续恢复时间的关系如图 6 所示. 1~24 号观测井中地下水埋深恢复过程曲线也都具有相似的形状, 1 号和 3 号观测井中的埋深变化过程曲线几乎重合. 埋深恢复过程也经历了一个由快速转为缓慢的恢复过程, 可以看出, 埋深恢复过程在停止抽水后很短的时间内, 即可恢复到初始水平.

() 公路沿线地下水埋深变化. 目前沙漠公路沿线开采的地下水属于第四系潜水, 地下水埋深受地形因素影响很大, 垡间埋深一般在 1.3~13.9 m, 沙垄顶部埋深较大, 最大可达 63.2 m.

在自然条件下, 地下水埋深的变化主要受陆面蒸发、河流补给等自然因素的影响, 季节间呈现波动变化. 在沙漠地区, 当潜水埋深小于 5 m 时, 地下水即可受到陆面蒸发作用影响^[14]. 而塔里木沙漠公路沿线约 50% 的路段位于垡间区域, 地下水埋深较浅, 因此在自然条件下沙漠公路沿线地下水埋深的变化受陆面蒸发作用影响很大, 是重要的水资源消耗项. 塔里木沙漠公路沿线监测井地下水埋深监测数据表明, 防护林工程建成前后, 地下水埋深的变化不大, 仅表现为厘米级波动(表 8). 因此照目前的灌溉取水规模, 塔里木沙漠公路防护林工程尚未对地下水形成明显影响^[28].

() 地下水矿化度的变化. 根据沙漠公路沿线不同水位观测井的水样分析结果表明, 多数监测井矿化度较为稳定, 没有明显的变化趋势, 变化幅度在

$\pm 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 但在沙漠公路里程K182.2处, 自2006年9月至2007年11月该处地下水矿化度上升了 $2.13 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 呈现上升趋势(图7). 这是由于该处属地下水

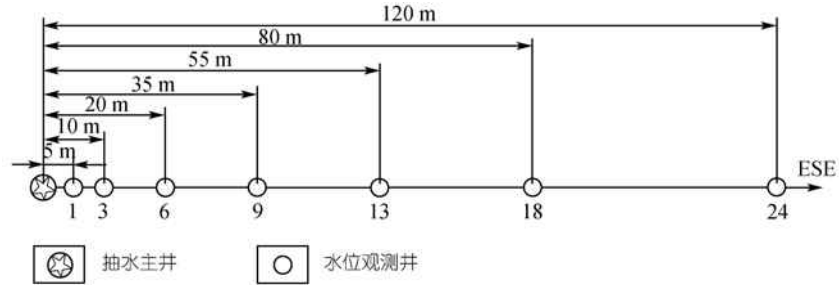


图4 抽水井与观测井位置示意图

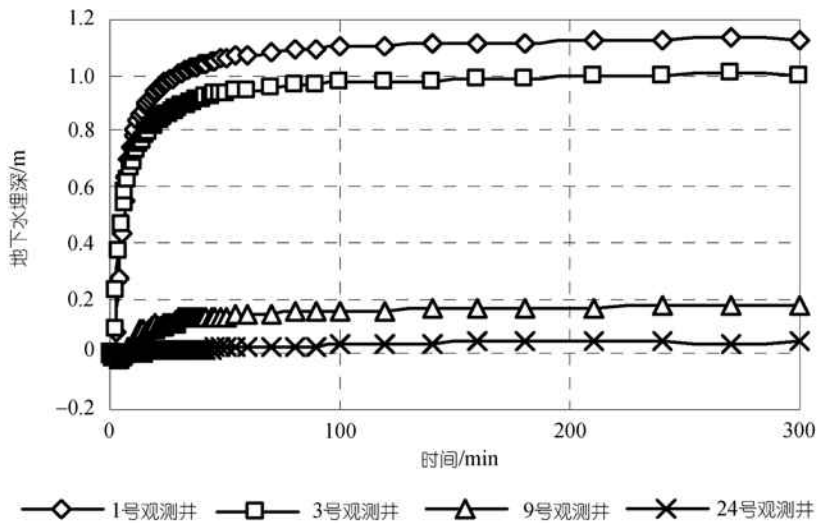


图5 地下水埋深降深随时间的变化过程曲线图

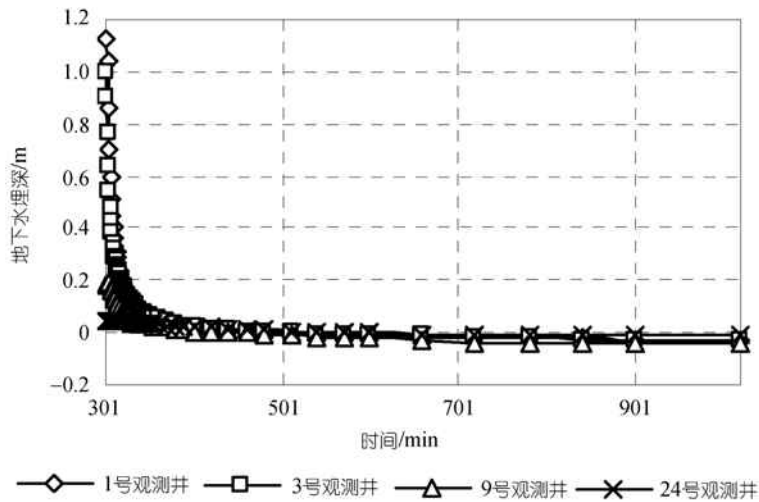


图6 地下水埋深恢复随时间的变化过程曲线图

表 8 防护林建成前(2003 年)后各监测井地下水埋深(m)的变化

年份	K145		K184		K248		K353		K451	
	埋深	变化值	埋深	变化值	埋深	变化值	埋深	变化值	埋深	变化值
2003 年	7.100	0	2.107	0	7.320	0	2.433	0	9.613	0
2004 年	7.150	-0.050	2.500	-0.393	7.370	-0.050	2.620	-0.187	9.538	0.07
2005 年	7.121	-0.021	2.185	-0.077	7.420	-0.100	2.499	-0.066	9.614	
2006 年	7.121	-0.021	2.258	-0.151	7.430	-0.110	2.557	-0.124	9.612	0.00
2007 年	7.140	-0.039	2.297	-0.190	7.445	-0.125	2.549	-0.116	9.602	0.01

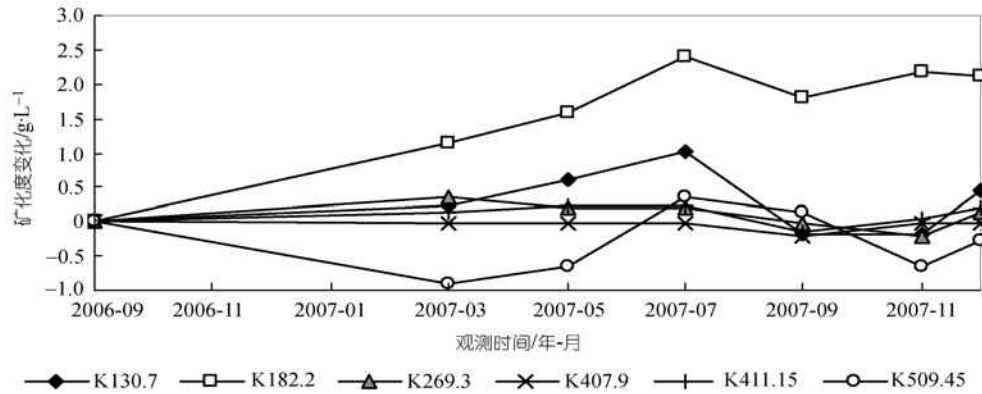


图 7 沙漠公路不同地点地下水矿化度的变化(K130.7 等为沙漠公路里程)

浅埋区,埋深仅为 1.75 m,因此水分垂直循环作用强烈,强烈潜水蒸发浓缩作用,可能是导致地下水矿化度升高的一个原因.另外,防护林灌溉淋洗土壤盐分可进入地下水,也可能造成地下水矿化度明显升高.后者可能是导致地下水矿化度升高的直接原因.

4 结论

() 防护林的风沙环境效应明显.防护林改变了近地表风沙运动过程,与裸沙地相比,防沙体系内风速、输沙率降低幅度分别达 64%~80%和 87.45%~99.02%.流沙地表风沙流沙粒浓度随高度下降速度很快,而防沙体系内部各点则下降缓慢.防沙体系内部粒度分选性较林带外沙丘顶部差,而较垄间平沙地好.防护林也使地表形态发生了显著的规律性变化.在防沙体系内部以风积地貌为主,形成了小尺度的灌丛积沙堆、中尺度的片状积沙和较大尺度的垄状积沙体.上风侧阻沙林带及其形成的垄状积沙体使垄间的低矮流动沙丘在移动过程中发生形态和走向变化,而到防沙体系下风侧随着风力的逐渐恢复,风沙流逐渐趋于不饱和,造成沙面风蚀.因此防沙体系对上风侧风沙流具有巨大的消能截沙作用.

() 防护林的土壤环境效应明显.与流沙地相

比,防护林定植后土壤容重减小,全盐含量、总孔隙度和含水量增大,不同林龄的林地之间土壤容重差均在 0.05 水平上差异显著,而总孔隙度、全盐和含水量在多数林地之间也达到明显差异.土壤肥力质量明显提高,其变化基本呈现“先快后慢”的规律.流沙地土壤综合肥力指数仅为 0.115,而 12 年防护林地土壤肥力指数达到 0.885.

() 防护林的小气候效应明显.流沙地不同高度的空气温度普遍高于林地,而湿度则表现为林地高于流沙地.随着高度的增加,防护林地对空气温度和湿度的影响愈小.林地 100 cm 深度范围内土壤温度明显低于流沙地,而且差异达到显著水平;随着深度的增大,土壤温度在林地和流沙地均降低,但流沙地的温度变幅明显大于林地,可见防护林对小区域的小气候具明显的调节作用.

() 防护林生物多样性效应明显.防护林建设后,林下植物和动物数量和种类增加,土壤微生物种类显著增加.各林龄防护林地土壤微生物脂肪酸的多样性指数 Shannon diversity(H)、丰富度 Richness(S)和均匀度 Evenness(E_H)差异明显,随着林龄增大,土壤微生物脂肪酸多样性指数逐渐增大,最大值出现在 8 年的林地上,土壤微生物脂肪酸的丰富度明显增

大,但均匀度并未增大,甚至有不明显的减小趋势.随着林龄的增大,林地土壤细菌DNA序列的多样性指数明显提高($\alpha = 0.01$),不同林龄土壤细菌DNA片段的条带数目差异明显,但均匀度指数在不同林龄土壤间差异不明显.因此防护林建设对于区域小环境改善作用明显,为生物生存和繁衍提供了较适宜环境.

()防护林取水灌溉的地下水环境效应不明显.单井抽水过程中地下水经历了埋深下降和埋深恢复过程,变化过程阶段性明显,停止抽水后埋深在很短

时间内即可恢复到初始水平.防护林建设前后对比发现,地下水埋深仅在厘米级范围波动,没有明显变化趋势.防护林灌溉抽水对地下水矿化度的变化影响不大,变化幅度在 $\pm 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,没有明显的变化趋势.但在地下水浅埋区发现地下水矿化度明显升高的现象,可能与土壤积盐经过灌溉淋洗到达地下水有关.因此塔里木沙漠公路防护林建设对局域生态环境因素影响程度较大,整体表现为正向的生态效应,有利于路域生态环境的持续发展.

参考文献

- 1 Jaime L A. Reforestation of arid and semi-arid zones in Chile. *Agricul Ecosys Environ*, 1990, 33(2): 111—127
- 2 Fearnough W, Fullen M A, Mitchen D J, et al. Aeolian deposition and its effect on soil and vegetation changes on stabilized desert dunes in northern China. *Geomorphology*, 1998, 23(2-4): 171—182
- 3 Zhang C L, Zou X Y, Pan X H, et al. Near-surface airflow field and aerodynamic characteristics of the railway-protection system in the Shapotou region and their significance. *J Arid Environ*, 2007, 71(2): 169—187
- 4 Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China. *Geomorphology*, 2007, 88(3-4): 254—265
- 5 Duan Z H, Xiao H L, Li X R, et al. Evolution of soil properties on stabilized dunes of the Tengger Desert, China. *Geomorphology*, 2004, 59(1-4): 237—246
- 6 Li X R, Xiao H L, Zhang J G. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in Shapotou region of Tengger Desert, northern China. *Restor Ecol*, 2004, 12(3): 376—390
- 7 Li X R, Ma F Y, Xiao H L, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *J Arid Environ*, 2004, 57(1): 1—16
- 8 Li X R, Zhang J G. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand fixing vegetation in arid desert region. *Acta Bot Sin*, 2000, 42(9): 965—970
- 9 周智彬, 李培军, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林土壤微生物的生态分布特征. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 47—51
- 10 马金珠, 李吉均, 高前兆. 气候变化与人类活动干扰下塔里木盆地南缘地下水的变化及其生态环境效应. *干旱区地理*, 2002, 25(1): 16—23
- 11 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路对近地表风沙运动过程的影响. *干旱区研究*, 2007, 24(2): 247—254
- 12 周智彬, 徐新文, 雷加强, 等. 咸水灌溉下塔里木沙漠公路防护林盐分平衡及盐分运移. *干旱区研究*, 2006, 29(4): 470—475
- 13 中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部. 塔里木沙漠石油公路. 北京: 石油工业出版社, 1996. 535—549, 612—616
- 14 徐新文, 李丙文, 周智彬, 等. 塔中沙漠基地路生物防沙技术示范. *土壤通报*, 2001, 32(专): 112—114
- 15 雷加强, 王雪芹, 王德, 塔里木公路风沙危害形成研究. *干旱区研究*, 2003, 20(1): 1—6
- 16 陈广庭等, 著. 塔里木盆地沙漠石油公路沿线风沙环境的形成与演变. 北京: 中国环境科学出版社, 1997
- 17 钱广强, 董治宝. 大气降尘收集方法及相关问题研究. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 779—782
- 18 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用. 北京: 地质出版社, 1978. 44—56
- 19 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究. *土壤学报*, 2001, 38(2): 176—183
- 20 Robert P, Larkin C, Wayne H. Effect of swine and dairy manure amendments on microbial communities in three soils as influenced by environmental conditions. *Biol Fer Soil*, 2006, 43: 51—61
- 21 Ritchie N J, Schutter M E, Dick R P, et al. Use of length heterogeneity PCR and fatty acid methyl ester profiles to characterize microbial communities in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, 66: 1668—1675
- 22 刘千枝. 景电灌区植被类型对风沙流结构的影响. *甘肃林业科技*, 1997, 22(3): 13—17
- 23 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 20—28
- 24 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林影响下地表形态的变化. *科学通报*, 2008, 53(增刊): 7—17
- 25 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤肥力质量变化与评价. *科学通报*, 2008, 53(增刊): 112—122
- 26 王海峰, 雷加强, 李生宇, 等. 塔里木沙漠公路防护林的温度和湿度效应研究. *科学通报*, 2008, 53(增刊): 33—42
- 27 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林区土壤微生物的立地条件效应. *土壤通报*, 2008, 39(2): 287—292
- 28 范敬龙, 徐新文, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路沿线地下水位的时空变化及其影响因素分析. *科学通报*, 2008, 53(增刊): 43—51