

# 通海隧道施工涌突水灾害与环境影响研究

孙晋玉<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 许模<sup>1</sup>, 陈松<sup>2</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:** 通海隧道是中国云南国际铁路通道昆明-河口线上的主要工程,也是云南省在建的最长隧道。隧道全长 10 302 m,全隧道为单面坡,最大坡度为 20.4%。该隧道在通海县境邻近杞麓湖,作为通海县重要的水资源,杞麓湖具有工农业用水、调蓄、防洪、航运、旅游、水产养殖等功能,是通海县社会经济发展的主体。隧道施工以来,在进出口的数个出水点涌出大量的地下水,由于工程区为生态敏感的岩溶地区,因此亟需查明隧道涌水与周边杞麓湖等水体的水力联系。通过对隧址区岩溶水文地质条件的研究,在充分了解区域构造环境、褶皱与断裂特征、掌握地下水含水岩组及其富水特性、地下水补径排特征的基础上,划分出隧址区的水文地质单元,结合隧道施工涌水状况以及已开挖段所揭示的地质条件等,利用地质原形研究和同位素分析等方法重点分析隧道涌水来源及其与杞麓湖的水力联系,明确隧道工程对周边地区水环境的影响。

**关键词:** 通海隧道; 岩溶涌突水危害; 环境影响

中图分类号: TU94<sup>+</sup> 3.1; X821

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0069-05

## Environmental Impact and Prediction of Gushing Water of Tonghai Tunnel Engineering, Yunnan Province, China

SUN Jin-yu<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, XU Mo<sup>1</sup>, CHEN Song<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu 610059, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Tonghai tunnel is 10.302 km long, which is a super long tunnel on the Kunming-Hekou international railway now under construction. As the tunnel is near by the Qilu Lake, which is the main water source of Tonghai Country, thus the detection of the hydraulic connection between the tunnel and Qilu lake is essential. This paper outlines karst hydro-geologic conditions and the investigation of the regional tectonic environment, folds and fractures, main aquifers and their water-rich characteristics, underground water recharge, runoff, and drainage conditions plus the hydro-geologic units of the tunnel area. Combined with gushing water conditions in tunnel construction process and geological condition in excavated sections, the source of gushing water and its hydraulic connection with Qilu Lake has been detected, the environmental impact of gushing water has been analyzed.

**Key words:** Tonghai tunnel engineering; Karst Gushing water; environmental impact

通海隧道是中国云南国际铁路通道昆明-河口线玉蒙铁路的主要工程,也是云南省在建的最长隧道。隧道全长 10 302 m,全隧道为单面坡,最大坡度 20.4%。该隧道在通海县境内的通过区邻近杞麓湖。作为通海县重要的水资源,杞麓湖具有工农业用水、调蓄、防洪、航运、旅游、水产养殖等功能,是通海县社会经济发展的主体。隧道施工以来,在进出口的数个出水点涌出大量的地下水,由于工程区为生态敏感的

岩溶地区,因此亟需查明隧道涌水与周边杞麓湖等水体的水力联系。

资料表明,可溶性白云岩与灰岩等碳酸盐岩地段占通海隧道总长近 90%。受云南特殊大地构造背景控制,隧道通过区断裂和褶皱发育强烈,白云岩、灰岩等碳酸盐岩类硬质岩被密集的节理、劈理和小断层切割,导致岩体松动,普遍含水,地下水的补给、径流、排泄特征具有很大的随机性;隧道涌突水部位和涌水量

收稿日期: 2010-12-15

修回日期: 2011-01-12

资助项目: 国家自然科学基金(40672175); 地质灾害防治与环境保护国家重点实验室开放基金(GZ2005-04)

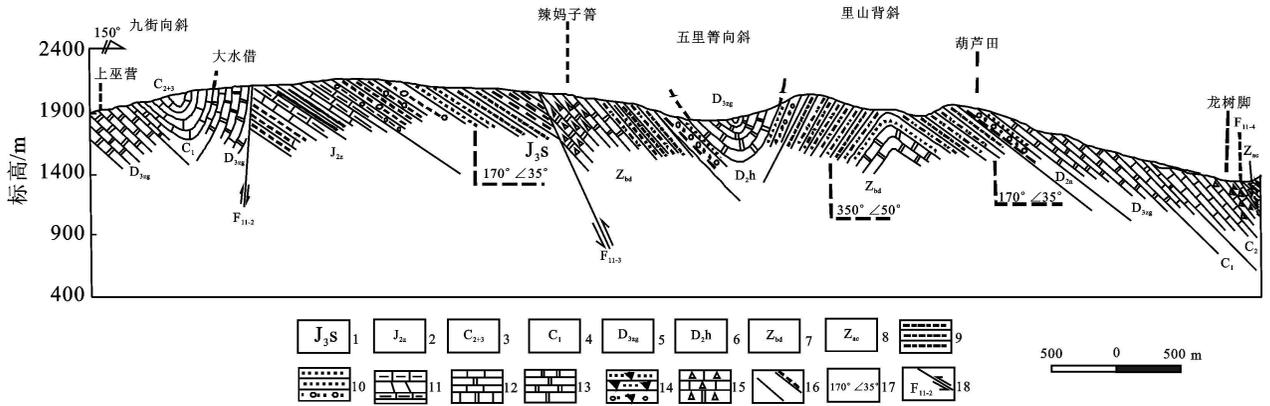
作者简介: 孙晋玉(1973-),女,在职博士,副教授,主要从事水文地质与工程地质专业教学科研工作。E-mail: sunjinyu@cdu.cn

通信作者: 张强(1971-),男,辽宁营口人,博士,副教授,主要从事水文地质、工程地质与环境地质教学科研工作。E-mail: zhangqiang\_cdu@qq.com

难以按常规思路确定。由于大断裂和裂隙大面积发育,隧道高程较低,隧道涌突水与周边湖泊、水库及井泉连通的可能性极大,隧道施工的环境影响有待论证。针对这一特殊情况,查清地下水活动规律及其补给、径流与排泄特征,划分地下水的径流系统,明确隧道施工对周边水环境的影响就显得尤为必要。

## 1 区域地质条件

受早先形成的经过通海县城的 NW 向断裂控



1. 上侏罗统蛇店组; 2. 中侏罗统张河组; 3. 中、上石炭统; 4. 下石炭统宰格组; 6. 中泥盆统海口组; 7. 上震旦统陡山沱组; 8. 下震旦统澄江组; 9. 粉砂岩、泥页岩粉砂岩; 10. 砂岩、含砾砂岩; 11. 钙质泥岩、泥灰岩; 12. 灰岩、白云质灰岩; 13. 白云岩; 14. 岩屑砂岩; 15. 挤压碎裂岩; 16. 地层界线、平行不整合界线; 17. 产状; 18. 逆断层及编号

图 1 隧址区地质剖面图

## 2 地下水类型及水文地质单元

受区内褶皱及断裂影响,本区元古界-新生界地层均有出露,但分布凌乱。区内地层岩性组合复杂,富水性强烈不均。根据隧道区岩性组合特征和地下水的赋存空间,可将本区地下水类型分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水、碳酸盐岩及碎屑岩裂隙-岩溶水、碳酸盐岩类岩溶水。

隧道通过区含水岩组特征见表 1。其中下石炭统主要分布于通海隧道出口处里山背斜南东翼、进口处习家营-红龙滩向斜两翼,以及李家山区向斜四周。岩性主要为浅灰、深灰色,中-厚层状灰岩夹页岩,局部含有中-厚层状白云岩。地表有轻微溶蚀现象,受乌龙塘断层影响,岩体较为破碎。

资料表明研究区内近东西向分布的沿龙凤山-黑地网头-火草石-生家瓦屋-积目山-老尖山的侏罗系地层形成的 2 000 m 以上的山峰,既构成了地表分水岭,同时也成为两侧水系流域内地下水活动的天然屏障,形成了以曲江、杞麓湖为排泄基准面的两个独立的水文地质单元。

隧址区构造活动导致的地层变形、破裂,控制着地层分布、断裂及其它导水空间的力学性质和延伸状况,进而控制岩溶水的活动。根据通海隧址区及其附

制,本区与其 NE 侧的李家山区的构造线及地层不连续。总体上,本区构造属“山”字形构造体系东翼构造,构造线方向为 NE-NEE 向,呈向南东凸出的弧形,主要表现为褶皱断裂带。其中构造主要由 3 条 NE 向断裂、一个背斜和两个向斜组成。由隧道进口至出口,依次为九街向斜、通海断层(F<sub>11-2</sub>)、泥者断层(F<sub>11-3</sub>)、五里菁向斜、里山背斜和乌龙塘断层(F<sub>11-4</sub>) (图 1)。

近的水文地质条件特征,对隧道内岩溶水活动影响较大的主要包括杞麓湖区、隧址区褶皱和断裂构造。虽然两个构造区的构造形态并不连续,但是由于断裂错移、穿插,局部可溶岩通过断层接触,构造区内的岩溶水是有可能相互连通的。因此,隧道工程面临的环境问题有:杞麓湖区与隧址区岩溶水的联系、地下水的来源;隧道排水对环境的影响。

## 3 隧道岩溶涌水状况分析

通海隧道自开工至 2007 年 11 月,已发生 4 次大的突发性突水、突泥(石)地质灾害,由于采取了有效措施,未造成重大损失。现分述如下:

进口于 2007-08-22 在平导 PDK29+203 m 处发生突水、突沙,最大涌水量达 2 万 m<sup>3</sup>/d; 2007-12-23 于平导 PDK29+310 m 处发生突水,拱腰左侧及平导掌子面涌出水量约 60 L/s。目前正洞 DK29+174-平导 PDK29+310 m 稳定涌出水量 2.2 万 m<sup>3</sup>/d,正洞与平导积水较严重,积水深度超过 1 m。

隧道出口段平导 PDK35+770 m 处于 2007-06-26 发生大规模突水、突石(图 2)。最大涌水量超过 12 万 m<sup>3</sup>/d,突石超过 1 000 m<sup>3</sup>,石块最大达 2 m;而后正洞、迂回导坑在相同位置出水,涌水量长期维持在 3 万 m<sup>3</sup>左右,连续 4 个月不衰,总排水量已超过 400 万 m<sup>3</sup>。

表 1 隧道通过段出露的含水岩组特征和富水性

岩组富水特征	含水岩组名称	地下水类型	对应地层层位	分布区域和主要水文地质特征 (据现场调查和区域水文地质调查报告)
强含水岩组	碳酸盐岩含水岩组	碳酸盐岩岩溶水	$C_1、C_{2+3}、D_{3zg}$	在整个隧道区均大面积出露, 受构造控制, 呈 NE - SW 走向。地表和地下岩溶强烈发育, 地下径流模数为 $5 \sim 10 L/(s \cdot km^2)$
中等-弱含水岩组	松散岩类孔隙含水岩组	松散岩类孔隙水	Q	广泛分布在隧道区地表, 除了粉质、泥质和炭质黏土富水性较差外, 卵石土和角砾土富水性为中等分布于隧道进口和中部、五里箐向斜西翼及里山背斜核部, 岩溶中等发育, 地下水赋存和运移于砂岩裂隙和白云岩岩溶溶隙中, 地下径流模数为 $1 \sim 2 L/(s \cdot km^2)$
	碳酸盐岩及碎屑岩类裂隙-岩溶含水岩组	裂隙-岩溶水	$Z_{hd}$	分布于隧道进口段、里山背斜两翼及隧道出口, 局部可见小流量下降泉, 地下径流模数为 $1 \sim 2 L/(s \cdot km^2)$
隔水岩组	碎屑岩裂隙含水岩组	基岩裂隙水	$J_3s、T_3y、D_2h、Z_{ac}$	分布于隧道进口段, 地表极少有泉水出露, 仅见季节性小流量的沟水, 地下径流模数为 $0.6 \sim 1 L/(s \cdot km^2)$ , 属于隔水岩组
	碎屑岩裂隙含水岩组	基岩裂隙水	$J_{2x}、J_{1f}$	

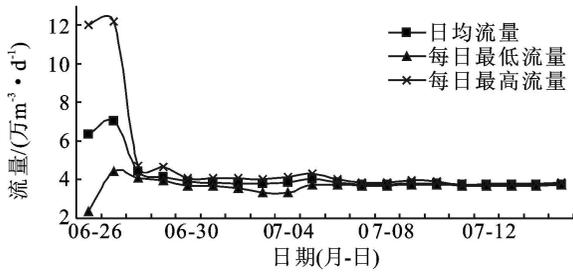


图 2 通海隧道出口段平导 PDK35+770 m 出水点涌水量历时曲线

分析 PDK35+770 m 出水点涌水量历时曲线, 可分为 4 个阶段:

I 阶段: 2007-06-26 揭露出水点后, 涌出水量逐渐增大, 于 6 月 27 日达到峰值  $121\ 947\ m^3/d$ , 表明排水量以静储量为主, 随着时间的延续涌水通道被逐渐贯通, 反映隧址区岩体裂隙具备较大储水空间和储水能力。

II 阶段: 6 月 27 日后, 经过近 2 d 的大量涌水, 出水点水量出现迅速衰减, 反映存储于裂隙中的岩溶水被疏干。

III 阶段: 6 月 28 日涌水量由峰值快速降到  $44\ 202\ m^3/d$ , 至 7 月 5 日, 监测曲线反映水量总体呈缓慢下降趋势, 略有波动。这时隧道排泄的水量应来源于相邻含水层的水量补给。

IV 阶段: 7 月 6 日至 7 月 15 日, 涌出水量趋于平稳, 维持在  $37\ 000\ m^3/d$  左右。反映隧道排水量与补给量达到了动态平衡状态, 涌水点受到了稳定的补给源补给。

隧道出口段平导 PDK35+735 m 于 2007-11-23 发生较大突水, 沿出口二号迂回导坑掌子面右下部宽大裂隙涌出, 涌水量约  $200\ L/s$ 。裂隙宽度  $0.4 \sim 1.1$

m 不等, 顶拱上方最大宽度近 2 m, 深部不可测。裂隙壁面较为光滑。

出口段两件突水事件表明, 出口段单斜岩层地段白云岩节理发育, 形成岩溶水通道, 属构造-岩溶裂隙水复合。

#### 4 隧道涌水的来源

现场采取水样 21 组, 其中隧道出水点 5 组、下降泉 6 组、上升泉 1 组、地下暗河样 1 组、库南河水 6 组(分段)、地表水库样 1 组、杞麓湖湖水样 1 组, 选取重点水样进行同位素测试  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  各 13 组、水化学常规测试 15 组。同位素测试结果(图 3)显示: 大部分的水样位于降水线附近, 反映地下水来源于隧址区接受的大气降水。同时, 氢氧稳定同位素  $\delta^{18}O - \delta D$  (SMOW) 关系反映出: (1) 杞麓湖湖水与隧址区地下水(包括隧道内出水点、下降泉、上升泉、地下暗河等)及库南河的  $\delta^{18}O - \delta D$  差异明显, 非常孤立, 反映湖水与隧址区地下水在来源上存在差异, 隧道涌水与湖水联系较弱; (2) 隧道出水点在进、出口差异较为明显, 隧道出口的两个水样位于降水线以上, 反映出出口段平导和迂回导坑发育的宽大剪张裂隙涌出水直接来源于大气降水; 隧道进口的两个水样位于降水线以下, 偏差值较小, 反映其虽然仍来源于大气降水, 但经历了一定的水岩相互作用,  $\delta^{18}O$  明显偏富集; (3) 同样, 位于降水线以下的两个下降泉水,  $\delta^{18}O$  明显偏富集, 反映其径流途径较长或也经历了一定的水岩相互作用。(4) 位于上科庄北 1 500 m(隧道轴线 DK31+550 左 15 m 左右)的钻孔涌出的上升泉, 明确为大气降水补给。

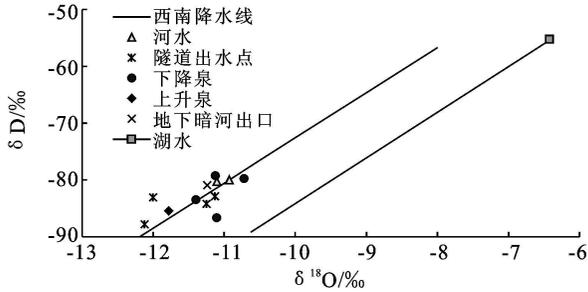


图 3 通海隧道地下水稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  (SMOW) 关系

## 5 隧道涌水与杞麓湖的水力联系

结合上述区域地下水的补给径流排泄特点、地下水径流系统划分与隧道涌水来源分析等,认为隧道出口段涌水与杞麓湖无明确的水力联系,理由如下:

(1) 据《1:20 万玉溪幅水文地质报告》,杞麓湖蓄水量 2.3 亿  $\text{m}^3$ ,水深 3~6 m,最深 10 m 左右;湖积物厚度为 20~90 m,岩性以灰黑色砂质黏土、淤泥为主,厚度从盆地边缘向中心由薄变厚,湖积层透水性微弱。通海盆地总体为一汇流盆地,通过沟谷及岩溶

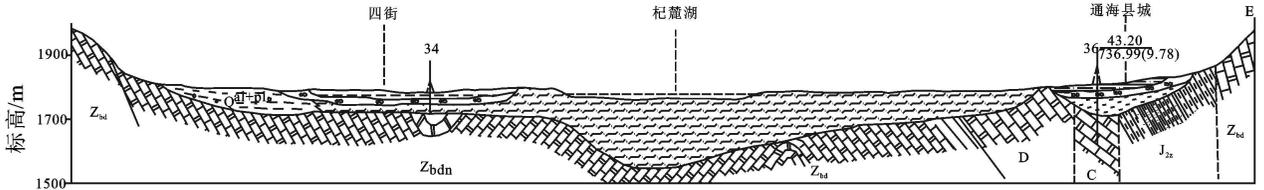


图 4 通海盆地横剖面图(据 20 万玉溪幅水文地质图)

(4) 在汛期地下暗河管道无法满足泄洪需求的情形下,当地政府建设一条沟通杞麓湖和曲江支流库南河的泄洪隧道,也反映天然条件下向南侧的地下水径流不畅。

(5) 同位素测试结果反映湖水与隧址区地下水在来源上存在差异,隧道涌水与湖水联系较弱。

种种迹象表明:杞麓湖湖积层较厚,且透水性很弱;东南侧受到侏罗系砂页岩的阻隔,接受南侧地下水补给,而向南流动的水动力条件微弱,其湖水排泄仅能通过暗河管道和人工隧道进行等,可以认为隧道涌水与杞麓湖水无关。

## 6 隧道涌水对通过区环境的影响

通过对隧址区地表水的动态观测资料、本次调查数据以及隧道涌水量的综合分析,结果表明:目前隧道施工产生的大量涌水并未对隧址区周边水环境造

成明显的影

响。大泉,汇集四周山地降水及地下水,地表无泄水通道,唯一的排泄方式地下暗河系统,即盆地东北角的岳家营地下暗河系统,向东北方向华宁盆地排泄。

(2) 尽管湖底碳酸盐岩存在与隧址区白云岩、灰岩连通的可能性,湖积层透水性很弱,水流通道不畅,且湖泊东南侧侏罗系砂页岩的阻隔,导致水流不畅(图 4)。而且即便杞麓湖(1 794 m)与隧道出口段(1 610~1 780 m)存在水力联系,但其最大径流长度达 20 km 的水力坡度已非常小。由达西定律分析,渗流量与介质渗透能力、水力坡度成正比,两个小数值的乘积当然更小。由此表明杞麓湖与隧道出口即使连通,基于渗透性和水力坡降的原因,但可能发生的联系也是十分微弱的。

(3) 天然条件下,杞麓湖湖水通过其东侧(岳家营)的地下暗河管道排向东侧的华宁盆地,反映通海盆地与华宁盆地具有密切的水力联系和一定的水力坡度。因此在杞麓湖东侧再发育一条向南的地下水通道,几率极小。

成明显的影

响。理由有:(1) 在隧道沿线布置了 18 个水环境动态观测点,其中泉水观测点 12 个,地表水观测点 6 个。观测数据显示,仅一个泉点流量有所下降,其余各点流量一直保持稳定。(2) 将隧道通过区部分泉点的实测流量与往年流量对比分析(表 4)。除 S09 等个别点流量有所下降外,其余各点流量均高于往年值,反映隧道疏干对周边地下水、地表水影响较小。(3) 同时,隧道出口平导 PDK35+770 m 在 2007-06-26 至 07-15 涌水量量测数据表明:水量 6 月 26 日至 6 月 27 日逐渐增大(6 月 27 日达峰值 121 947  $\text{m}^3/\text{d}$ ),6 月 27 日至 6 月 28 日迅速衰减(6 月 28 日为 44 202  $\text{m}^3/\text{d}$ )。从 6 月 28 日至 7 至 15 日涌水量趋于稳定,维持在 37 000  $\text{m}^3/\text{d}$  左右。

表 2 本次实测流量与历史流量对比

泉点编号	地理位置	实测流量/( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	区域报告/( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )
S09	隧道上方花草石村东 1 500 m 水塘小沟旁泉	0.03	3.90
S10+ S11	观音山山腰地下暗河出口	38.50	6.49
S12	观音山山腰泉点	30.00	17.10
S13	金家湾东面泉群	109.00	54.00

至2008年底,隧道施工总排水量已超过500万 $m^3$ ,如此大的排水量,若与地表水有联系,必然会在地表水系中有所反映。但通过对现有监测资料的综合分析,已确定当前的隧道涌水并未对地表水量造成影响。因此,当前地表水环境没有因隧道涌水而发生显著变化。

至于后期的施工是否会对水环境产生影响,则有待进一步论证。

## 7 结论

(1) 结合区域地质资料与隧道涌突水情况分析,考虑水样同位素测试结果,通海隧道涌突水主要为隧道西侧山区的大气降水。

(2) 杞麓湖湖积层较厚,且透水性很弱;湖水同位素特征与隧址区地下水差异显著;东南侧受到侏罗系砂页岩的阻隔,接受南侧地下水补给,而向南流动的水动力条件微弱,其湖水排泄仅能通过暗河管道和人工隧道进行等,可以认为隧道涌水与杞麓湖水无关。

(3) 通过对现有监测资料的综合分析,已确定当前的隧道涌水并未对地表水量造成影响。因此,当前地表水环境没有因隧道涌水而发生显著变化。

至于后期的施工是否会对水环境产生影响,则有待进一步论证。

### 参考文献:

- [1] 许模,张强.通海隧道岩溶涌水危险性评价[D].成都:成都理工大学,2007.
- [2] 黄润秋,许模,徐则民,等.圆梁山特长隧道施工地质灾害问题预测[J].成都理工学院学报,2001,28(2):363-367.
- [3] 孙维兵,许模,张强,等.四川某隧道岩溶水文地质条件及涌水量初步研究[J].水土保持研究,2008,15(2):232-234.
- [4] 黄鸿健,张民庆.宜万铁路隧道工程岩溶及岩溶水分析与应对[J].现代隧道技术,2009,41(2):22-34.
- [5] 张强,许模,蒋良文.毛坝向斜水动力环境的水化学:同位素信息分析[J].地质灾害与环境保护,2001,12(2):52-61.
- [6] 黄承标,梁宏温,温远光,等.窿缘桉防护林小气候的初步研究[J].浙江林学院学报,1999,16(3):247-245.
- [7] 陈祥伟,丁宝永,刘建松,等.天然次生柞木林不同群落结构小气候效应的研究[J].东北林业大学学报,1990,18(S3):60-69.
- [8] 谭芳林,叶功富,张水松,等.木麻黄基干林带小气候效应及梯度变化的研究[J].防护林科技,2008(S1):108-118.
- [9] 康立新,季永华,张日连,等.农田林网主林带透风系数和疏透度关系探讨[J].江苏林业科技,1992(1):12-16.
- [10] 杜鹤强,韩致文,颜长珍,等.西北防护林防风效应研究[J].水土保持通报,2010,30(1):117-120.
- [11] 李永平,冯永忠,杨改河.北方旱区农田防护林防风效应研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(6):92-98.
- [12] 王冬米,梁景彬,卢国耀,等.沿海防护林对农业减灾增产的初步研究及价值核算[J].防护林科技,2007(2):54-55.
- [13] 曹新孙.农田防护林学[M].北京:中国林业出版社,1983.
- [1] 胡海波,张金池,鲁小珍.我国沿海防护林体系环境效应的研究[J].世界林业研究,2001,14(5):37-43.
- [2] 张璐,林伟强.森林小气候观测研究概述[J].广东林业科技,2002,18(4):52-56.
- [3] 贺庆棠.气象学[M].北京:中国林业出版社,1993:22-24.
- [4] 谢平,李燕.海岸沙地防护林的小气候效应[J].中国沙漠,2001,21(1):63-96.
- [5] 李志真,谭芳林,叶功富,等.木麻黄沿海防护林小气候效应的定位研究初报[J].福建林业科技,2000,27(1):1-4.

(上接第68页)

(4) 泥质海岸防护林本身具有一定的特殊性,在沿海防护林建设中起到了重要作用。本文通过对各项小气候要素的观测研究,评价了泥质海岸防护林所发挥的防护效应,并从中发现防护林建设中存在的问题和改进方向,为泥质海岸防护林改善沿海生态环境发挥最佳生态效益提供了一定的依据和经验。

### 参考文献:

- [1] 胡海波,张金池,鲁小珍.我国沿海防护林体系环境效应的研究[J].世界林业研究,2001,14(5):37-43.
- [2] 张璐,林伟强.森林小气候观测研究概述[J].广东林业科技,2002,18(4):52-56.
- [3] 贺庆棠.气象学[M].北京:中国林业出版社,1993:22-24.
- [4] 谢平,李燕.海岸沙地防护林的小气候效应[J].中国沙漠,2001,21(1):63-96.
- [5] 李志真,谭芳林,叶功富,等.木麻黄沿海防护林小气候效应的定位研究初报[J].福建林业科技,2000,27(1):1-4.
- [6] 黄承标,梁宏温,温远光,等.窿缘桉防护林小气候的初步研究[J].浙江林学院学报,1999,16(3):247-245.
- [7] 陈祥伟,丁宝永,刘建松,等.天然次生柞木林不同群落结构小气候效应的研究[J].东北林业大学学报,1990,18(S3):60-69.
- [8] 谭芳林,叶功富,张水松,等.木麻黄基干林带小气候效应及梯度变化的研究[J].防护林科技,2008(S1):108-118.
- [9] 康立新,季永华,张日连,等.农田林网主林带透风系数和疏透度关系探讨[J].江苏林业科技,1992(1):12-16.
- [10] 杜鹤强,韩致文,颜长珍,等.西北防护林防风效应研究[J].水土保持通报,2010,30(1):117-120.
- [11] 李永平,冯永忠,杨改河.北方旱区农田防护林防风效应研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(6):92-98.
- [12] 王冬米,梁景彬,卢国耀,等.沿海防护林对农业减灾增产的初步研究及价值核算[J].防护林科技,2007(2):54-55.
- [13] 曹新孙.农田防护林学[M].北京:中国林业出版社,1983.