

引用格式: 李晓军, 徐昊, Gokdemir Cagri, 等. 隧道排水诱发地下水位下降对地表植被影响的 TSPAC 分析方法[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(9): 1261.

LI Xiaojun, XU Hao, GOKDEMIR Cagri, et al. TSPAC analysis method for impact of groundwater drawdown induced by tunnel drainage on terrestrial vegetation[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1261.

隧道排水诱发地下水位下降对地表植被影响的 TSPAC 分析方法

李晓军¹, 徐昊¹, Gokdemir Cagri¹, 王飞², 黄学文³

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230031;

3. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 山岭隧道建设可能会改变周边地下水渗流场, 严重时会导致地下水, 威胁地表植被生存。针对现有研究难以定量分析隧道排水对地表植被影响的问题, 提出以土壤水基质势作为植被生存状态指标, 建立隧道-土壤-植被-大气连续体(tunnel-soil-plant-atmosphere continuum, TSPAC)分析模型。通过 Richards 方程描述植被根系区的土壤水分运移, 将大气、地下水渗流模型作为上下边界输入方程, 计算植被根系区基质势分布, 据此衡量植被凋萎过程并判断其生存状态。将该分析方法应用于大别山区明堂山隧道工程, 分析隧道建设对地表植被的影响, 结果表明: 1) 植被根系区土壤水基质势对地下水位和大气变化的响应存在滞后性和非均匀性, 植被凋萎是渐进、动态的过程; 2) 大气条件在该区域对植被生存起控制性作用; 3) 隧道建设引起的地下水位变化对周边地表植被影响较小, 且对不同植被类型影响程度不一。TSPAC 分析方法的创新性在于: 提出了物理概念明确、易于工程使用的植被生态危险状态判断指标与依据, 在 SPAC 分析模型基础上引入隧道地下水渗流模型, 将隧道排水的工程因素与环境因素相结合, 分析隧道排水—地下水位下降—地表植被影响的整体过程, 并在实际工程中进行应用, 可为隧道建设的环境保护提供一种新思路。

关键词: 山岭隧道; 排水; 地下水位; 地表植被; TSPAC 分析模型; 土壤水基质势

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2020.09.003

文章编号: 2096-4498(2020)09-1261-11

中图分类号: U 45

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



扫二维码听语音
与作者在线交流

TSPAC Analysis Method for Impact of Groundwater Drawdown Induced by Tunnel Drainage on Terrestrial Vegetation

LI Xiaojun¹, XU Hao¹, GOKDEMIR Cagri¹, WANG Fei², HUANG Xuewen³

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230031, Anhui, China;

3. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: The mountain tunnel drainage may change the ambient groundwater seepage field and even drain groundwater resources, which threatens terrestrial vegetation. In order to quantitatively analyze the impact of tunnel drainage on terrestrial vegetation, the soil water matric potential is selected as an indicator for plant survival state to build an analysis model of tunnel-soil-plant-atmosphere continuum (TSPAC). In the model, the Richards equation is utilized to describe the moisture movement in the root zone. The atmosphere and the groundwater seepage model are input to the Richards equation as top and bottom boundary conditions. Then, the soil matric potential distribution of the root zone is secured by solving the Richards equation. Based on matric potential distribution within the root zone, the plant dynamic wilting process can be evaluated and its survival state can be judged. The method is applied to Mingtangshan Tunnel in

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877246); 上海市高峰学科资助项目(土木工程)

第一作者简介: 李晓军(1975—), 男, 安徽天长人, 2001年毕业于同济大学, 结构工程专业, 博士, 教授, 现从事隧道与地下工程的教学与研究工作。

E-mail: lixiaojun@tongji.edu.cn.

Dabieshan Mountains to analyze its drainage impact on terrestrial vegetation. The applicable results show that: (1) The response of matric potential in the plant root zone to variations in groundwater levels and atmospheric conditions is lagged and nonuniform, thus the plants wilt gradually instead of withering immediately after the groundwater table descends. (2) The atmospheric conditions play the dominant role in vegetation survival in this region. (3) The drainage impact of the tunnel on surrounding plants is relatively small and different for various vegetation. The TSPAC analysis method innovatively introduced tunnel-groundwater seepage model to traditional SPAC models. By integrating factors that represent tunnels and environment, the approach analyzed the whole process of “tunnel drainage-groundwater recession-vegetation withering”. The method integrates tunnel, soil, vegetation and atmosphere as a whole to analyze the eco-environmental impacts of tunnel drainage. The approach can provide a novel thought of facilitating tunnel engineering environmentally friendly.

Keywords: mountain tunnel; drainage; groundwater table; terrestrial vegetation; TSPAC analysis model; soil water matric potential

0 引言

长期以来,工程界关注环境对隧道建设的影响较多,而较少关注隧道建设对环境的影响,尤其是对地表植被的影响。隧道在施工和运营期的突涌水、排水措施等因素会改变地下水渗流场的分布^[1-2],严重时会导致地下水,破坏地下水环境,进而威胁地表植被的生长与生存^[3]。

目前,关于隧道建设引起地下水位变化进而产生次生影响的研究主要集中在对生活用水^[4]、湖水^[5]、泉水^[6]等地表水体的影响,直接分析对地表植被影响的研究较少且依赖于现场监测^[7-9]。Liu 等^[7]利用同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)测量法分析了隧道排水对植被生理过程的影响,结果表明隧道开挖引起的地下水位下降改变了植物干湿季根系吸水模式;Zheng 等^[8]、王芳其等^[9]分析了树木年轮宽度在隧道建设前后共 50 年内的变化情况,认为隧道排水引起的地下水位降低显著降低了树木的生长速度,生长低谷期长达 15 年。由于依赖于长期监测,上述方法在规划和设计阶段难以得到应用。

在隧道规划和设计阶段的综合环境评估^[10-13]、地下水限排^[14-18]研究中,隧道排水对植被的影响常隐含于气候条件^[10]、植被覆盖度^[10]、年降雨量/蒸发量^[10-13]、地下水埋深^[10-13]、土壤含水量^[11]等评价指标。在设计隧道排水限值时,对植被的影响常简化为长期水-能平衡关系^[14]、植被需水深度^[15-17]、地下水位恢复时间^[18]。这些方法忽略了隧道、地下水、土壤、植被与大气之间的紧密关系,所采用的植被影响指标过于简化,难以准确考虑隧道排水对地表植被的影响。

针对上述方法的不足,本文将隧道、地下水、土壤、植被、大气作为整体,从各部分间水分运移角度出发,提出隧道-土壤-植被-大气连续体(tunnel-soil-plant-atmosphere continuum, TSPAC)分析模型,以根系区土

壤水基质势 h 作为衡量植被缺水程度的指标^[19],分析实际气象条件下地表植被发生凋萎的动态过程,从而得到隧道排水对地表植被影响的定量化结果。最后,将该方法应用于安徽省大别山区明堂山隧道。

1 植被影响的判断方法

1.1 SPAC 系统中的水分运移

土壤-植被-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)从物理活动的角度出发,将土壤、植物、环境大气看作是时刻发生着能量传输、物质(水分)运移的动态物理系统^[20]。“连续体”的概念强调了水分在土壤、植物、大气三者之间运动的连续性与整体性。SPAC 系统中的水分运移遵守水量平衡和水势驱动的原则,即水分在 SPAC 系统中满足质量守恒定律,且总是从水势较高处流向水势较低处。典型 SPAC 系统中的水分运移过程如图 1 所示。

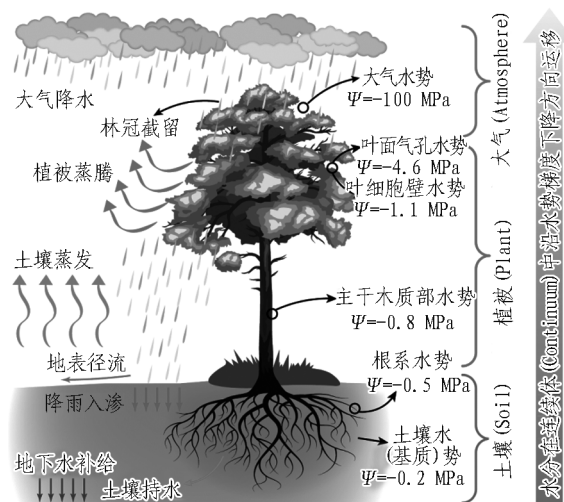


图 1 典型 SPAC 系统中的水分运移过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water movement in a typical SPAC system

图 1 中左侧各物理量表示 SPAC 系统中水量均衡的各分项,满足如式(1)所示的平衡方程。

土壤持水=大气降水-(林冠截留+植被蒸腾+土壤蒸发+降雨入渗+地下水补给+地表径流)。(1)

图1中右侧展示了 SPAC 系统中各组成部分可能的水势值。大气水势通常小于植物叶片水势,叶片内的水分在叶面气孔处水势梯度的作用下蒸发到大气中;叶片内水分减少使水势降低,进而向下汲取树干木质部内的水分;最终,植物叶面的蒸腾拉力在植物内部逐层向下传递至根系处,再经由植物根系从土壤中汲取水分。

1.2 植被影响的衡量指标

地下水位下降与土壤水基质势变化的关系如图2所示。山岭隧道建设会改变地下水渗流场,严重时会导致植物缺水凋萎^[21-22]。水位较低时,表土中的水分与地下水的联系被切断而成为上层滞水,且因土壤蒸发、根系吸水等因素而逐渐减少,导致根系从土壤中获得水分逐渐困难。当土壤水分减少至一定程度后,土壤孔隙间毛细水连接断开,植物根系在其与土壤颗粒的接触界面上无法获得水分^[23],此状态称为永久凋萎。

为定量描述植物根系从土壤中获得水分的“困难程度”,引入土壤水基质势的概念^[19]。土壤水基质势反映了土壤抵抗重力、蒸发、根系吸水而持有水分的能力^[24]。植物根系吸水可以直观地理解为植物利用根系水势(根系持水能力)“克服”土壤水基质势而从土壤中“争抢”水分的过程^[25],这一过程将引起包气带土壤水基质势发生变化。相较于含水量,土壤水基质势 h 作为土壤水分指标具备数值稳定、概念直观的优点^[25]:1)同一植物在给定基质势的不同土质中可获得的土壤水分相近;2)基质势与植物叶水势关系显著,且对同一植物保持稳定;3)根系吸水主要由土壤水势与根水势的差值决定。

1.3 植被生态危险状态判据

当根系—土界面上某点的基质势下降到永久凋萎点 h_w 时,根系将无法继续从该点处获取水分,因此可以用 h_w 来代表根系的生态危险状态,表述为植物生态危险状态判断准则1(局部判据):根系附近任意位置土壤水基质势低于 h_w ,该处根系进入生态危险状态。

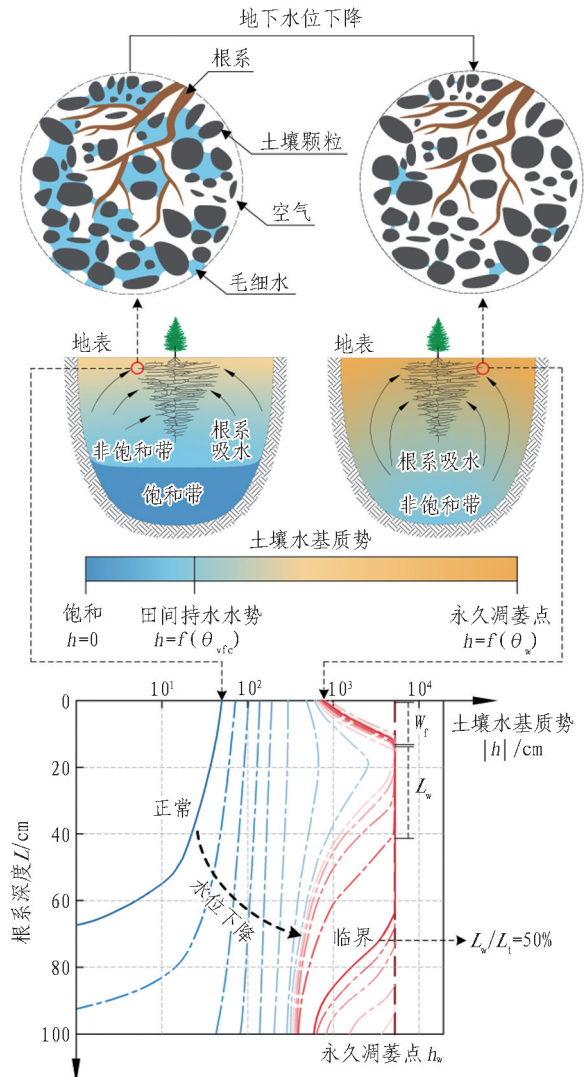
h_w 实际上反映了植物蒸腾的临界水势,但植物并不会因为根系区某一点达到 h_w 而整体进入生态危险状态。试验表明,植物根系部分干燥时,蒸腾作用虽然被抑制^[26],但植被仍能正常存活。

当地下水位降低后,植物根系区基质势分布会逐步变化,达到 h_w 的根系区域也逐渐扩大,即根系会动态凋萎。随着根系凋萎区域的扩展,植被整体的生态危险程度逐步加深,最终造成不可逆的枯死,其临界状

态对一维根系可表示为

$$L_w/L_t \geq L_e/L_t^{[19]}. \quad (2)$$

式中: L_w 为根系—土界面上土壤水基质势达到 h_w 的根系长度,简称根系凋萎长度; L_t 为根系总长度; L_e 为有效根系深度,表示植物获取大部分水分的根区部分。



上部为隧道排水引起地下水位降低后,根系附近毛细水连接断开;中部为土壤水分消耗后水势的变化(θ_{vfc} 为田间持水量, θ_w 为永久凋萎含水量);下部为隧道排水前后,植物根系的动态凋萎(W_f 为湿润锋深度)。

图2 地下水位下降对土壤水基质势的影响

Fig. 2 Influence of groundwater decline on soil water matric potential

满足式(2)的状态即为植物整体的生态危险状态,表述为植物生态危险状态判断准则2(整体判据):当植物一定比例长度的根系进入生态危险状态时,植物整体即进入生态危险状态。

2 植被影响分析的 TSPAC 模型

2.1 TSPAC 模型简介

如图1所示,SPAC系统中的水分运移包括表土

内的包气带渗流、土壤-植物间的根系吸水、植物-大气间的叶面蒸腾、土壤-大气间的土壤蒸发与大气降水等过程^[27]。传统的 SPAC 模型将地下水视为整个系统的下部边界,对地下水系统内部的渗流场变化描述较少,没有考虑地下工程建设对地下水渗流场、地下水位的影响,因而,传统的 SPAC 模型难以刻画隧道排水对地表植被的影响。

本文基于 SPAC 系统建立了隧道-土壤-植被-大气连续体 (tunnel-soil-plant-atmosphere continuum, TSPAC) 模型,在 SPAC 系统水分运移过程的基础上进一步考虑隧道-地下水渗流场、地下水-包气带间的水分运移。TSPAC 模型包含 3 个子模型:大气模型、土壤与植被模型、地下水渗流模型。与传统 SPAC 模型的不同之处在于: TSPAC 模型在 SPAC 系统中引入地下水渗流模型,通过地下水渗流模型分析隧道排水引起的地下水位变化情况,随后将观测点处变化的地下水位输入一维非饱和渗流模型(土壤与植被模型)中作为可变水头的下边界条件。结合大气模型施加的代表地表能量和水分限制的上边界条件,土壤与植被模型通过求解 Richards 方程得到根系区域土壤水势变化,反映植物的动态凋萎过程,并依据植被生态危险状态判据判断其生态状态。TSPAC 分析模型各部分的耦合方法和分析流程如图 3 所示。

2.2 土壤与植被模型

植物生态影响指标与其危险状态判断均基于土壤水基质势,因此,分析的核心在于计算根系区基质势 h 的分布。利用式(3)的 Richards 方程可以对非饱和土壤渗流进行描述。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h) \nabla (h+z)] - S. \quad (3)$$

式中: θ 为土壤体积含水量; t 为时间; $K(h)$ 为非饱和导水率; h 为土壤水基质势; z 为距离重力势基准面高度; S 为源汇项。

为求解式(3),需要建立 $\theta-h$ 、 $K-h$ 、 $S-h$ 之间的关系。利用 Mualem-Van Genuchten 模型来描述 $\theta-h$ 、 $K-h$ 的关系,如式(4)~(6)所示。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, & h < 0; \\ \theta_s, & h \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2. \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}. \quad (6)$$

式(4)~(6)中: θ_r 、 θ_s 分别为残余含水量和饱和含水量; K_s 为饱和导水率; S_e 为有效饱和度; l 为孔隙连通参数,对于大多数土层可以设置为 0.5; α 、 n 为滞水曲线 $\theta-h$ 的形状参数; m 为土壤吸湿、脱湿曲线的关系, $m = 1 - 1/n$ ($n > 1$)^[28]。

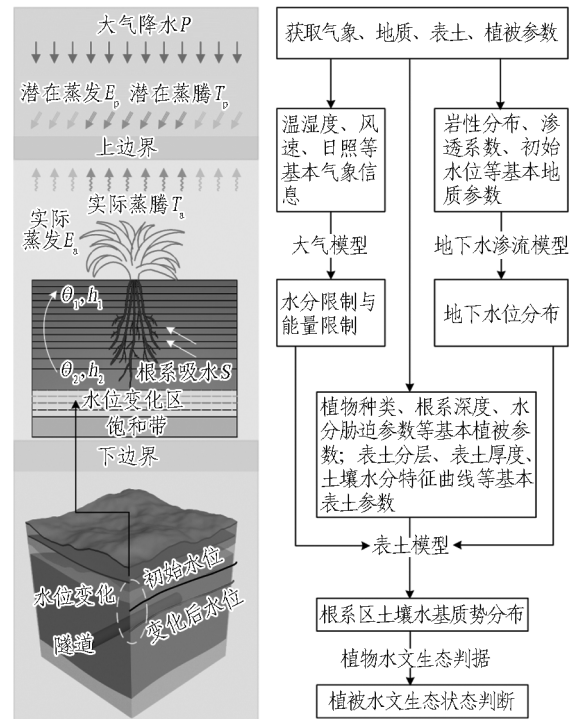


图3 隧道建设对植被影响的 TSPAC 模型耦合方法与分析流程

Fig. 3 Coupling method and flowchart of TSPAC model for evaluating impact of tunnel construction on vegetation

利用 Feddes 模型^[29]描述根系吸水 $S-h$ 关系,如式(7)~(10)所示。

$$S(h) = \alpha(h) S_p(z). \quad (7)$$

$$\alpha(h) = \begin{cases} 0, & h \leq h_w \text{ 或 } h \geq h_1; \\ \frac{h-h_1}{h_2-h_1}, & h_2 < h < h_1; \\ 1, & h_3 < h < h_2; \\ \frac{h-h_4}{h_3-h_4}, & h_w < h < h_3. \end{cases} \quad (8)$$

$$h_3 = \begin{cases} h_{3,L}, & T_p < T_{p,L}; \\ h_{3,H} + \frac{h_{3,L} - h_{3,H}}{T_{p,H} - T_{p,L}} (T_{p,H} - T_p), & \text{else}; \\ h_{3,H}, & T_p > T_{p,H}. \end{cases} \quad (9)$$

$$S_p(z) = \frac{R_L(z_r)}{\int_0^1 R_L(z_r) dz_r} T_p. \quad (10)$$

式(7)~(10)中: $\alpha(h)$ 为水分胁迫响应函数; $S_p(z)$ 为根系潜在吸水速率; $h_w < h_3 < h_2 < h_1$ 为根系在不同干湿状态下吸水速率变化的阈值, h_2 、 h_3 为初始、末态基

质势, h_1 为根系吸水厌氧点; $h_{3,H}$ 和 $h_{3,L}$ 分别为 h_3 的上、下阈值; T_p 为潜在蒸腾速率; $T_{p,L}$ 和 $T_{p,H}$ 为较低、较高潜在蒸腾速率; $R_L(z_r)$ 为根长密度, z_r 为根系相对深度, $z_r = z/L_r$, L_r 为根系长度。

2.3 大气模型

大气模型为土壤与植被模型的式(4)提供上边界条件,包括表示能量限制的潜在蒸发 E_p 、蒸腾 T_p ,以及表示水量限制的大气降水 P 。其中, P 由气象资料获得,潜在蒸发蒸腾 ET_p (即 $E_p + T_p$) 的估算可以基于陆面能量平衡与湍流通量转换关系,如采用 Penman-Monteith 方法、Kimberly-Penman 方法、Priestley-Taylor 方法^[30]。

目前,利用 Penman-Monteith 方法估算 ET_p 的应用较为广泛,其标准主要有 2 种:联合国粮农组织 (FAO) 提出的 FAO No. 56^[31] 和美国土木工程师协会 (ASCE) 提出的 ASCE Manual 70^[32]。2 种标准均采用 2 步法 (如图 4 所示): 首先根据日辐射、温湿度、风速等数据计算标准化潜在蒸发蒸腾量 ET_{sz} ; 再根据植物生长特性、密集程度、灌溉条件、气候状况等因素计算作物系数 K_c 。在各生长阶段的曲线,根据式(11)计算植物潜在蒸发蒸腾量 ET_p 。

$$ET_p = K_c \times ET_{sz} \quad (11)$$

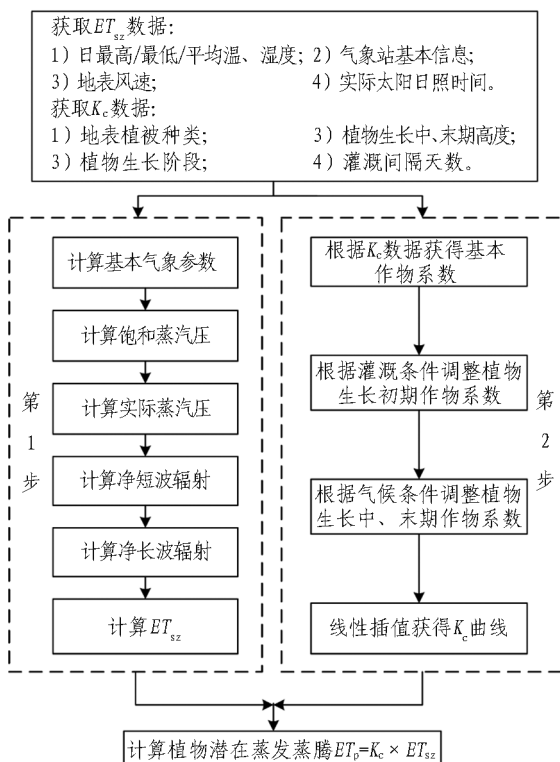


图4 大气模型计算流程图

Fig. 4 Flowchart of atmosphere model calculation

在获得 ET_p 后,将其划分为植物潜在蒸腾 T_p 和土壤潜在蒸发 E_p ,可以根据植物冠层对光照的阻截比例划分,利用基于比尔-郎伯光吸收定律 (式(12)) 进行描述。

$$\begin{cases} T_p = ET_p (1 - e^{-k \cdot LAI}); \\ E_p = ET_p e^{-k \cdot LAI}. \end{cases} \quad (12)$$

式中: k 为消光系数,与太阳角度、植被分布、叶面特征有关,经验值取 0.50~0.75; LAI 为叶面积指数,可由田间测量或遥感反演方式获得。

2.4 地下水渗流模型

地下水渗流模型为土壤与植被模型的式(3)提供下边界条件,可以由实测数据或数值计算获得地下水位分布。渗流控制方程如式(13)所示,其定解条件如式(14)所示。

$$\mu_s \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla H). \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} H|_{t=0} = H_0; \\ H|_{B_1} = H_{\text{fixed}}(t); \\ K \nabla H|_{B_2} = q(t). \end{cases} \quad (14)$$

式中: μ_s 为储水系数; H 为水头; K 为非均质含水层的渗透系数 (饱和导水率); H_0 为初始地下水分布; B_1 、 B_2 分别为第 1 类和第 2 类边界; $H_{\text{fixed}}(t)$ 为 B_1 上已知的水头函数; $q(t)$ 为 B_2 上渗流速度函数。

3 工程应用

3.1 工程与环境概况

明堂山隧道是岳武高速 (安徽岳西至湖北武汉) 上的特长隧道,位于大别山腹地,隧道轴线方向为 $266^\circ \sim 272^\circ$,隧道左线全长为 7 548 m,右线全长为 7 531 m,最大埋深约为 548 m,最小埋深为 322 m,平均埋深为 435 m。隧址区附近地形为东西向悬崖组成的凹谷,地形变化可分为 3 台阶: 较低 (海拔低于 300 m)、中等 (海拔 300~800 m)、较高 (海拔 800 m 以上)。隧址区附近地质情况为第四纪覆盖层较薄且有机质含量高,全风化层较厚,含水层破碎严重,下伏基岩主要为中等风化的花岗岩和片麻岩,发育有 3 条主要断裂带。

明堂山地区气候为亚热带湿润气候,年平均降水量为 1 452.2 mm (1976—2004 年),年平均温度为 14.5°C (1957—2004 年)。植物生态影响研究区域为隧址区附近约 180 km^2 的流域范围,该范围内主要植被类型为杉木、毛竹、马尾松、黄山松、灌木林以及农作物,农作物包括水稻、玉米、茶叶等,隧道与高速公路连接处分布的农田主要为水稻田。钻探结果表明,表土主要为粉土、粉质黏土和软塑性黏土,厚度为 0.5~2.1 m,土壤母质由全风化片麻岩和较薄粉质黏土层的残余黏土矿物组成,表土厚度可达 20 m。隧道工程与环境参数见表 1 和表 2。

表 1 隧道工程参数
Table 1 Tunnel parameters

类型	长度/m	路基宽度/m	埋深/m	轴线方向/(°)	坡度/%	设计高程/m
分离式公路隧道	7 548(左线)	24.5	322~548	266~272	0.8	396(进口)
	7 531(右线)		(平均 435)			459(出口)

表 2 环境参数
Table 2 Environmental parameters

气候	年均降水量/mm	年均蒸发量/mm	年均温度/℃	优势物种	地表高程/m	主要岩性
北亚热带季风湿润气候	1 452.2 (春夏季占 70%)	1 418.3	14.5 (-15.2~39.4)	杉木、马尾松、 毛竹、农作物	404.3~1 002.5 (隧道中线)	花岗岩、片麻岩

3.2 分析过程

土壤与植被模型在 Hydrus 1D 中利用有限单元法求解一维 Richards 方程获得根系区土壤水基质势分布。

大气模型的植物潜在蒸发蒸腾量 ET_p 在 Python 中编程计算,采用 ASCE Manual70 推荐的日时间尺度草地型亚热带植物公式计算标准潜在蒸发蒸腾量 ET_{sz} ,作物系数 K_c 。按照 FAO 56 推荐的四生长阶段线性插值方法确定。

地下水渗流模型在 Modflow 中利用有限差分法求解三维渗流方程获得地下水位分布,对隧道附近长 12 km、宽 15 km 的区域进行分析,通过网格尺寸的变化反映从隧道到流域的尺度变化,在隧道表面设置排水节点模拟隧道内部的零压力和排水条件^[2]。

3.3 分析工况

选取隧道附近杉木林和水稻田分析隧道建设对该位置附近植物的生态影响。地下水渗流模型数值模拟^[2]与现场监测结果表明,明堂山隧道开挖排水后,该位置附近地下水位由地面以下 1.2 m 下降至 15 m,随后地

下水位逐渐补给恢复,并稳定在地面以下 7.5 m。

为探究地下水位变化、大气条件与土质对植物生存状态的影响,分别对分层土和等效均质土分析以下工况:

- 1)隧道排水前,地下水位保持初始状态 1.2 m 时,上边界为大气边界;
- 2)隧道排水后,地下水位保持稳定水位 7.5 m 时,上边界为大气边界;
- 3)、4)地下水位分别以较快速度(46 cm/d)、较慢速度(30 cm/d)从初始水位 1.2 m 处下降至最低水位 15 m,上边界取为均匀分布的 E_p 、 T_p 、 P 定通量边界。

3.4 模型参数

3.4.1 土壤与植被模型参数

分别取上层 1.2 m 和 7.5 m 的一维土柱作为土壤与植被模型分析区域,土壤水分关系采用 Mualem-Van Genuchten 模型(包含-2 cm 进气值),不考虑吸湿、脱湿滞后性,土层与土壤水分特征参数如表 3 所示。

表 3 土层与土壤水分特征参数
Table 3 Parameter values of soil and soil water characteristic

土类	深度/cm	θ_s	θ_r	α	n	$K_s/(cm/d)$
黏壤土 ^①	0~50	0.41	0.095	0.019	1.31	6.240
黏土 ^①	50~150	0.38	0.068	0.008	1.09	4.800
	350~1 500					
粉质黏土 ^①	150~350	0.36	0.070	0.005	1.09	0.480
粉质黏壤土 ^{①、②}	0~1 500	0.43	0.089	0.010	1.23	2.189

注:①为 Mualem-Van Genuchten 模型的典型值^[33];②为等效饱和导水率均质土层。

15 m 土层断面的垂向等效饱和导水率为 2.189 cm/d,接近粉质黏壤土的平均值,因此,以粉质黏壤土建立均质土层模型与实际的分层土做对比。根系吸水采用式(7)—(10)的 Feddes 模型,根长密度可表示为:

$$R_L(z_r) = \frac{b^2 R_{avg}}{b + e^{-b} - 1} (1 - z_r) e^{-bz_r} \quad (15)$$

式中: b 为根系分布形状参数; R_{avg} 为平均根系密度。

不同栽培方式、生长年限的杉木根系最大深度为 0.4~1.5 m^[35-36],取根系长度为 0.7 m;水稻根系最大深度为 0.5~1 m^[32],取根系长度为 0.5 m^[37]。2 种植物均采用中等密度的植物根系参数,根系吸水与分布参数如表 4 所示。根据既有试验数据^[38],假设研究区内植物根系获取的 70% 水分来源于根系最上部的 50%,取有效根系深度 L_e 为 50% 的根系总长度。

表4 根系吸水与分布参数

Table 4 Parameters of root water uptake and root distribution

植物	Feddes 模型参数							根系分布参数 ^[35-36]		
	$h_1^{①}/\text{cm}$	$h_2^{①}/\text{cm}$	$h_{3,H}^{①}/\text{cm}$	$h_{3,L}^{①}/\text{cm}$	h_w/cm	$T_{P,L}^{②}/(\text{cm/d})$	$T_{P,H}^{②}/(\text{cm/d})$	L_r/m	R_{avg}	b
杉木 ^[38-39]	0	0	-60	-1 200	-15 000	0.1	0.500	0.7	0.1	2
水稻 ^[40]	100	55	-160	-250	-15 000	0.1	0.382	0.5	0.1	2

注: ①为水分胁迫响应函数 $\alpha(h)$ 在不同干湿状态下吸水速率变化的阈值; ②为潜在蒸腾速率 T_p 的较高、较低阈值。

3.4.2 大气模型参数

杉木的生长期为2—11月,可分为5个生长阶段:萌动期(2月上旬至3月中旬)、生长初期(3月下旬至5月中旬)、生长盛期(5月中旬至10月中旬)、生长末期(10月下旬至11月下旬)、休眠期(12月下旬至次年2月下旬)^[37]。不考虑休眠期,取2013年2月5日—2013年11月25日的气象数据,共294 d。水稻的生长期为5月至10月^[31],取2013年5月1日—2013年9月30日的气象数据,共153 d。潜在蒸发蒸腾量进行划分时,消光系数 k 取0.6。杉木生长期内大气边界通量与降水情况如图5所示。水稻生长期的第83~102天内作物生长旺盛但无降水,属于干旱期,考虑到水稻生长特性,安排在第88天和第96天进行人工灌溉,每次灌溉40 mm,灌溉占总水量补给的8.1%。2种植物的大气模型参数见表5。

3.4.3 地下水渗流模型参数

渗流模拟区域内主要岩性为片麻岩和花岗岩,通

过对原位钻孔数据进行克里金插值获得空间岩性分布,利用异位数据拟合估算该地区岩层渗透系数与深度的变化关系^[2]。

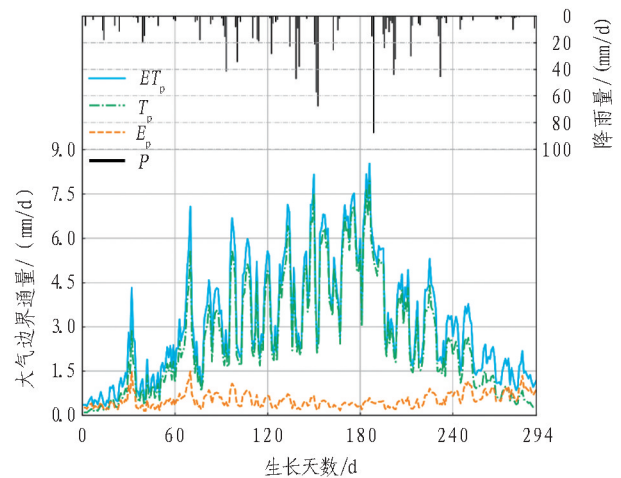


图5 杉木生长期内大气边界通量与降水情况

Fig. 5 Atmospheric boundary flux and precipitation during growth stages of *Cunninghamia lanceolata*

表5 大气模型参数

Table 5 Parameters of atmosphere model

植物	植物生长天数 ^[31,36] /d				叶面积指数 ^[39-45]				作物系数 ^[32,46]		
	t_{ini}	t_{dev}	t_{mid}	t_{end}	LAI_{ini}	LAI_{dev}	LAI_{mid}	LAI_{end}	K_{ini}	K_{mid}	K_{end}
杉木	0~38	39~99	100~252	253~293	2.10	3.1	4.8	1.90	1.00	1.00	1.00
水稻	0~30	31~60	61~120	121~153	2.85	5.1	7.0	3.35	1.08	1.43	0.66

注: ini、dev、mid、end 分别为植物生长的初期、生长期、中期、末期;模拟中杉木与水稻的生长开始时间(生长日期第0天)分别为2013年2月5日和2013年5月1日。

3.5 分析结果与讨论

各工况下杉木根系区土壤水基质势分布如图6所示。对工况1和工况2选取了缺水较为严重情形的分析结果。地下水位降低后,各工况下水稻根系区土壤水基质势分布如图7所示。

3.5.1 地下水位影响

地下水位由1.2 m初始水位降低至7.5 m后,杉木与水稻根系区土壤水基质势变化见图6和图7中工况1和工况2。杉木根系区最大凋萎长度为22 cm,占根系长度的31%;水稻根系区最大凋萎长度为23 cm,占根系长度的46%。考虑到水稻生长高度依赖于农业灌溉,若进行少量灌溉,则最大凋萎长度降低至9 cm,占根系总长度的18%。因

此,根据植物生态危险状态整体判据,该处植被未进入生态危险状态。

地下水下降速度对土壤剖面基质势分布的影响见图6中工况3和工况4。地下水以较快速度(46 cm/d)下降,14 d后水位降低至7.64 m,基质势最大值为82.9 cm;以较慢速度(30 cm/d)下降,21 d后水位降低至7.5 m,基质势最大值为97.2 cm,即水位下降至相同深度时,慢速下降工况的基质势较大(较干旱)。地下水位降低后,基质势的变化响应有一定的滞后性,随着上层滞水的逐渐消耗,土壤剖面基质势逐步增大,当水位降低至相同深度时,慢速降低工况由于经历了更长时间,基质势对水位变化的响应更加充分,因此基质势相对较大。

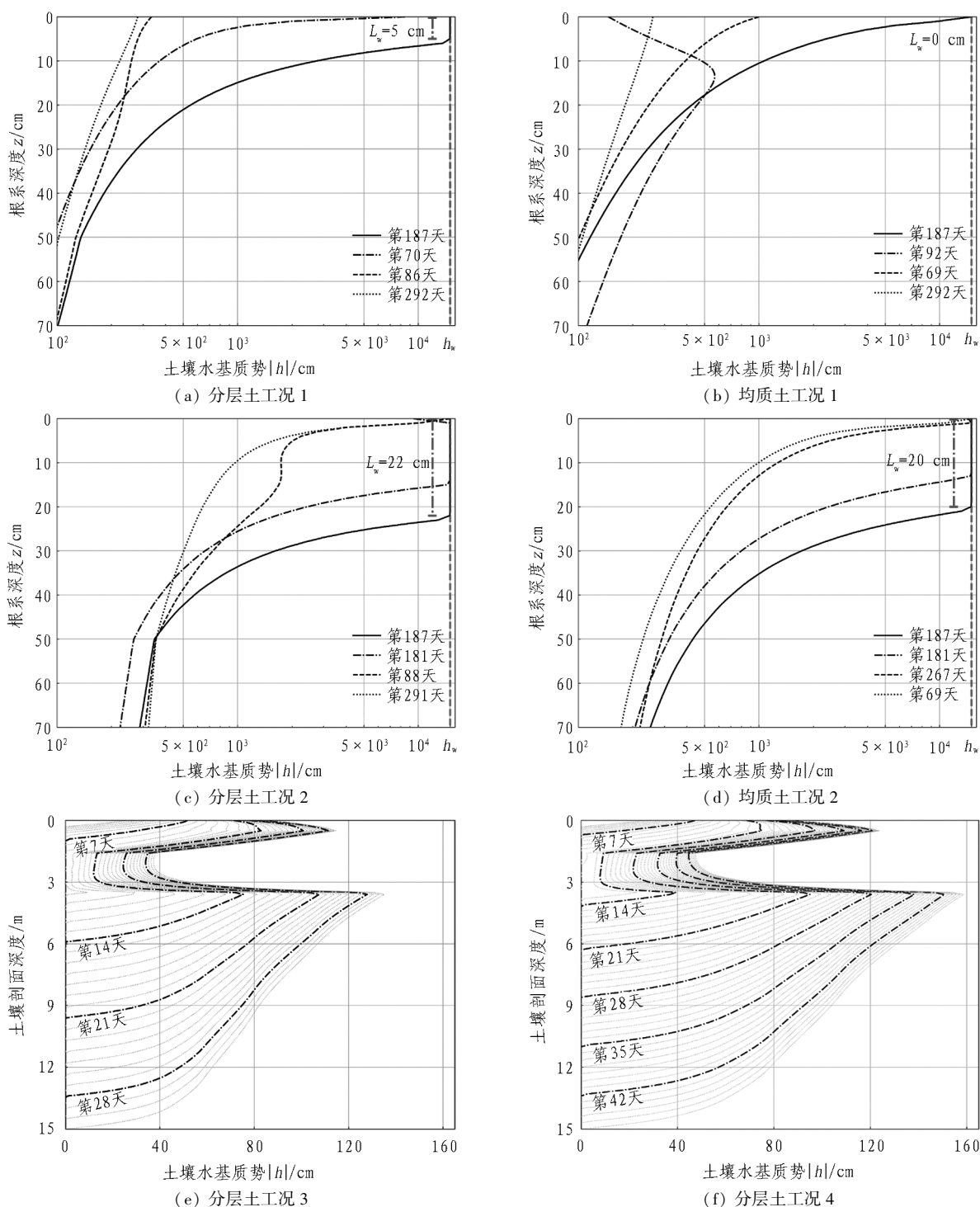


图6 各工况下杉木根系区土壤水基质势分布

Fig. 6 Matric potential distribution of *Cunninghamia lanceolata* under each condition

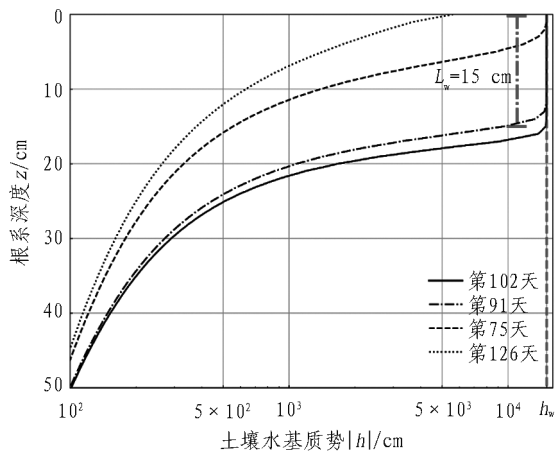
由于基质势对地下水位变化响应的滞后性,根系的凋萎同样是逐步发展的,植物并不会因为地下水降低超过某一深度后立即发生整体凋萎。

由图6中工况3和工况4可知,土壤水基质势变化不是均匀的,地下水位匀速下降,但基质势的变化存在一定差异。第7~14天内根系区基质势的变化显著大于其他时间段,即地下水位在3.3~5.4 m间变化所引起的基质势变化较大。

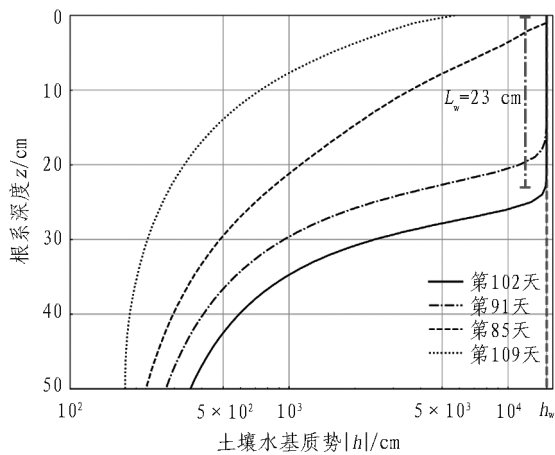
3.5.2 大气条件影响

地下水位降低前后,杉木与水稻在整个生长期中生态最危险情况分别发生在其生长期的第187天和第102天,实际均为2013年8月11日(见图6和图7中工况1和工况2),此时潜在蒸发蒸腾达到峰值,作物生长旺盛,但已有约20 d无降水,根系区域表层水分迅速减少,因此植物逐渐逼近生态危险状态。2种植物在地下水位改变前后的极限状态均出现在降水较

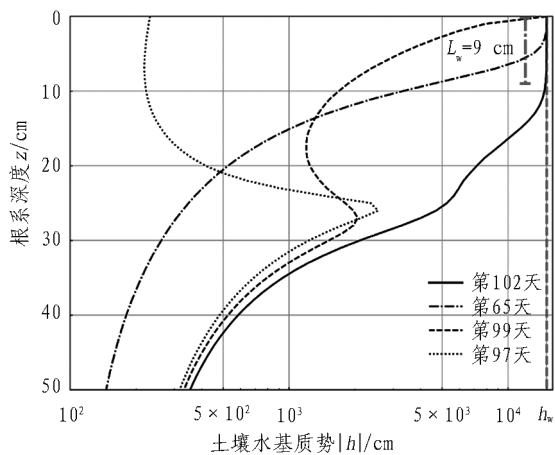
少、生长旺盛的8月中旬,这表明该地区植物生存状态除受地下水位影响外,大气条件也是重要的控制因素。



(a) 分层土工况 1



(b) 分层土工况 2



(c) 分层土少量灌溉

图7 各工况下水稻根系区土壤水基质势分布

Fig. 7 Matric potential distribution of paddy field under each condition

3.5.3 土质影响

各种工况下,植被在具有垂向等效渗透性的均质土中均表现出略强的凋萎抵抗性,见图6(b)和图6(d)。在不考虑土壤的吸湿、脱湿曲线滞后性时,等效均质土根系区的基质势变化规律与实际的分层土类

似,最大凋萎深度接近。

3.5.4 植被差异影响

地下水位降低后,杉木根系最大凋萎长度增加了17 cm,占根系总长的24%;水稻根系最大凋萎长度增加了8 cm,占根系总长的16%,且水稻根系在干旱期内进行少量灌溉后最大凋萎长度减小至9 cm,小于地下水位下降前无灌溉的工况。树木(杉木)受地下水位影响较大,农作物(水稻)更依赖于人工灌溉。

4 结论与讨论

为研究隧道建设对地表植被的影响,在SPAC基础上引入隧道因素,建立TSPAC分析模型,提出通过植物根系区土壤水基质势的变化反映植物的凋萎过程,在土壤与植被模型的Richards方程中考虑地下水环境和大气环境的影响,获得根系区土壤水基质势的动态分布,并据此判断隧道建设对地表植被的影响。

1) 土壤水基质势是土壤持水能力的物理指标,植物根系区域的土壤水基质势反映了根系从土壤中获取水分的难易程度,进而表征植被的生态状态。

2) 地表植被的生存状态不仅与地下水环境相关,同时与大气条件、土壤性质与组成、人工灌溉、植物种类等因素密切相关,衡量隧道建设对地表植被的影响需要在TSPAC整体框架中进行分析。

将TSPAC分析方法应用于安徽大别山区明堂山隧道,分析隧道建设对地表植被的影响,结论如下:

1) 根系区域土壤水基质势对地下水位、大气变化的响应存在滞后性、非均匀性,植物的凋萎是渐进、动态的过程,植被不会因为外界条件的改变立即枯死。

2) 在该地区大气条件控制下,地下水位及其降低速度对植被生存状态的影响较小。

3) 明堂山隧道建设对附近地表植被生态威胁较小,该地区树木(杉木)受地下水位影响较大,农作物(水稻)受人工灌溉影响较大。

本文提出的TSPAC方法可分析地表某一位置处植被受隧道排水的影响,下一步研究拟建立地下水、土壤与植被耦合分析模型,将TSPAC方法应用到流域尺度,分析隧道排水对流域内植被的整体影响。

参考文献(References):

- [1] 赵瑜,胡波,陈海林,等. 岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 1.
ZHAO Yu, HU Bo, CHEN Hailin, et al. Impact of tunnel engineering on groundwater environment in karst area[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental

- Engineering, 2018, 40(5): 1.
- [2] LI X, LI Y, CHANG C F, et al. Stochastic, goal-oriented rapid impact modeling of uncertainty and environmental impacts in poorly-sampled sites using ex-situ priors [J]. Advances in Water Resources, 2018, 111: 174.
- [3] KLØVE B, ALA-AHO P, BERRAND G, et al. Groundwater dependent ecosystems Part I: Hydroecological status and trends [J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(7): 770.
- [4] RAPOSO J R, MOLINERO J, DAFONTE J. Quantitative evaluation of hydrogeological impact produced by tunnel construction using water balance models [J]. Engineering Geology, 2010, 116(3/4): 323.
- [5] LI L, TU W, SHI S, et al. Mechanism of water intrush in tunnel construction in karst area [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(S1): 35.
- [6] WANG G F, LYU H M, SHEN J, et al. Evaluation of environmental risk due to metro system construction in Jinan, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10): 1114.
- [7] LIU J, SHEN L, WANG Z, et al. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley [J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 485.
- [8] ZHENG W, WANG X, TANG Y, et al. Use of tree rings as indicator for groundwater level drawdown caused by tunnel excavation in Zhongliang Mountains, Chongqing, Southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(15): 522.
- [9] 王芳其, 郑炜, 徐华, 等. 岩溶山区隧道地下水漏失对植物生长的影响分析及对策 [J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(6): 915.
- WANG Fangqi, ZHENG Wei, XU Hua, et al. Influence of groundwater loss induced by karst tunnel construction on growth of surrounding vegetation and its countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 915.
- [10] 刘志春, 王梦恕. 石板山隧道与地下水环境相互作用评价技术研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 321.
- LIU Zhichun, WANG Mengshu. Research on evaluation technique of interaction between Shibanshan tunnel and groundwater environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 321.
- [11] 白明洲, 陈云, 师海. 山岭隧道施工诱发地下水位下降环境风险评价 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 5.
- BAI Mingzhou, CHEN Yun, SHI Hai. Environmental risk assessment of underground water level falling induced by construction in mountain tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 5.
- [12] 姚红志, 张晓旭, 顾博渊, 等. 生态敏感区特长公路隧道建设对地下水环境扰动评价研究 [J]. 环境工程, 2015, 33(增刊1): 755.
- YAO Hongzhi, ZHANG Xiaoxu, GU Boyuan, et al. Research on disturbance of groundwater environment by construction of extra-long highway tunnel in ecological sensitive area [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 755.
- [13] LIU J, LIU D, SONG K. Evaluation of the influence caused by tunnel construction on groundwater environment: a case study of Tongluoshan Tunnel, China [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015: 1.
- [14] 马成. 高风险生态敏感区隧道排水量控制标准研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 33.
- MA Cheng. Study on control standard of tunnel drainage in high risk eco-sensitive area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2016, 12(5): 33.
- [15] 陈海帆. 基于植被需求的山岭隧道排水量确定方法与限排标准研究 [D]. 赣州: 江西理工, 2015.
- CHEN Haifan. Study on method of determining water drainage and limiting drainage standard for mountain tunnel based on ecological requirement [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.
- [16] 成盛. 基于生态需水保护的的山岭隧道地下水限排研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- CHENG Sheng. Research on groundwater limiting emissions for mountain tunnel based on ecological water demand [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [17] CHENG P, ZHAO L, LUO Z, et al. Analytical solution for the limiting drainage of a mountain tunnel based on area-well theory [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 22.
- [18] 李清华. 基于生态需水的隧道排水量研究 [J]. 施工技术, 2018, 47(1): 103.
- LI Qinghua. Research on tunnel displacement based on ecological water requirement [J]. Construction Technology, 2018, 47(1): 103.
- [19] GOKDEMIR C, RUBIN Y, Li X, et al. Vulnerability analysis method of vegetation due to groundwater table drawdown induced by tunnel drainage [J]. Advances in Water Resources, 2019, 133: 103406.
- [20] PHILIP J R. Plant water relations: Some physical aspects [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1966, 17(1): 245.
- [21] SARKAR S, CHAUDHURI S. Bacterial wilt and its management [J]. Current Science, 2016, 110(8): 1439.
- [22] PEDERSEN O, PERATA P, VOESENEK L A C J. Flooding and low oxygen responses in plants [J]. Functional Plant Biology, 2017, 44(9): 358.
- [23] ASSI A T, BLAKE J, MOHTAR R H, et al. Soil aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity [J].

- Irrigation Science, 2019, 37: 511.
- [24] GLINSKI J. Soil physical conditions and plant roots[M]. Boca Raton: CRC press, 2017.
- [25] DASGUPTA P, DAS B S, SEN S K. Soil water potential and recoverable water stress in drought tolerant and susceptible rice varieties [J]. Agricultural Water Management, 2015, 152: 110.
- [26] CONSOLI S, STAGNO F, VANELLA D, et al. Partial root-zone drying irrigation in orange orchards: Effects on water use and crop production characteristics [J]. European Journal of Agronomy, 2017, 82: 190.
- [27] YANG W, MAO X, YANG J, et al. A coupled model for simulating water and heat transfer in soil-plant-atmosphere continuum with crop growth [J]. Water, 2019, 11 (1): 47.
- [28] RASSAM D, ŠIMŮNEK J, MALLANTS D, et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media: Tutorial [M]. Adelaide: CSIRO Land and Water, 2018.
- [29] FEDDES R A. Simulation of field water use and crop yield [M]. Wageningen: Pudoc, 1978.
- [30] ZHANG K, KIMBALL J S, RUNNING S W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2016, 3 (6): 834.
- [31] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [32] Task Committee on Revision of Manual 70. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements (second edition) [M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [33] CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research, 1988, 24(5): 755.
- [34] SANTOS M A, VAN LIER J, DAM J C, et al. Benchmarking test of empirical root water uptake models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1): 473.
- [35] ZHANG J C, DEANGELIS D L, ZHUANG J Y. Theory and practice of soil loss control in eastern China[M]. New York: Springer-Verlag New York, 2011.
- [36] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州: 福建科学出版社, 1997.
- YU Xintuo. Cunninghamia lanceolata cultivation [M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Press, 1997.
- [37] LI S, ZUO Q, WANG X, et al. Characterizing roots and water uptake in a ground cover rice production system[J]. Plos One, 2017, 12(7): 713.
- [38] BENNETT O L, DOSS B D. Effect of soil moisture level on root distribution of cool-season forage species [J]. Agronomy Journal, 1960, 52(4): 204.
- [39] RABBEL I, BOGENA H, NEUWIRTH B, et al. Using sap flow data to parameterize the Feddes water stress model for Norway spruce[J]. Water, 2018, 10(3): 279.
- [40] LI Y, ŠIMŮNEK J, JING L, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D [J]. Agricultural Water Management, 2014, 142: 38.
- [41] 吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 川西亚高山暗针叶林叶面积指数的季节动态与空间变异特征[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 1.
- Lü Yuliang, LIU Shirong, SUN Pengsen, et al. Seasonal and spatial variations of leaf area index of sub-alpine dark coniferous forest during growing season in western Sichuan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(8): 1.
- [42] CURRAN P J, DUNGAN J L, GHOLZ H L. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 39(1): 3.
- [43] ZHAO M, XIANG W, PENG C, et al. Simulating age-related changes in carbon storage and allocation in a Chinese fir plantation growing in southern China using the 3-PG model[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(6): 1520.
- [44] JIN X, ZUO Q, MA W, et al. Water consumption and water-saving characteristics of a ground cover rice production system [J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 220.
- [45] TAO H, BRUECK H, DITTERT K, et al. Growth and yield formation of rice (Oryza sativa L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS)[J]. Field Crops Research, 2006, 95(1): 1.
- [46] LI D, CHEN J, LUO Y, et al. Short-term daily forecasting of crop evapotranspiration of rice using public weather forecasts[J]. Paddy and Water Environment, 2018, 16 (3): 397.