

# 溯源侵蚀作用下昔格达地层土质边坡的稳定性

王英杰, 朱宝龙, 郭华伟, 俞 艳

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 对四川省昔格达地层土体工程地质特性进行了分析。结果发现, 昔格达土体化学成分丰富, 含有一定量的易溶盐, 在地下水及地表水的作用下易于发生化学反应, 形成次生矿物, 使土体强度降低, 导致边坡易于产生失稳现象; 溯源侵蚀为河流侵蚀的一种类型, 水流的侧向冲刷与重力同时作用于沟谷边坡, 加快沟谷边坡的失稳速度。运用水力学、土力学等力学方法对溯源侵蚀的主要影响因素进行了分析。在非饱和土计算模型基础上, 建立了昔格达地层沟坡物理概化模型。模型在考虑了河流的侧向冲刷, 沟坡重力作用的基础上, 同时考虑动水压力作用对边坡的影响。针对目前非饱和土抗剪强度计算并不统一的情况, 推导并优化了非饱和土边坡稳定性计算公式。并结合建立的溯源侵蚀模型对昔格达地层土质坡稳定性进行了分析, 求得边坡稳定性系数为 1.061, 而采用经典的 Bishop 法求得相同条件下边坡稳定性系数为 1.212。结果表明, 优化的边坡稳定性求解方法得到的稳定安全系数较低。

**关键词:** 溯源侵蚀; 稳定性; 非饱和土; 昔格达地层

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0025-04

中图分类号: P642.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.012

## Earth Slope Stability of Xigeda Strata Under Headward Erosion

WANG Ying-jie, ZHU Bao-long, GUO Hua-wei, YU Yan

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest

University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

**Abstract:** Engineering geological characteristics of Xigeda strata in Sichuan Province was analyzed. Xigeda strata has multiple chemical composition that contains a certain amount of soluble salt, and tends to bring about chemical reaction and forms secondary minerals when submerged in ground water or surface water. This may reduce the strength of Xigeda strata and cause slope instability. Headward erosion is a kind of river erosion, and if the flow of the lateral erosion and gravity act on the slope at the same time, it would accelerate the instability velocity of slope. The main factors affecting headward erosion were analyzed using mechanical methods of soil mechanics, hydraulics etc. A generalized physical model of Xigeda strata slope was established on the basis of the unsaturated soil calculation. In order to make the model more accurate and reliable, the model took river lateral scouring and hydrodynamic pressure into consideration. Since the present unsaturated soil shear strength calculation was not unified, the stability calculation formulas of unsaturated soil slope was deduced and optimized. The stability of Xigeda strata slope was analyzed based on the headward erosion model, and the calculated stability coefficient of slope was 1.061, but slope stability coefficient under the same conditions was 1.212 using classical Bishop method. Because the coefficient calculated by the optimization calculation formula was lower.

**Keywords:** headward erosion; stability; unsaturated earth; Xigede strata

溯源侵蚀是在河流或沟谷发育过程中, 因水流冲刷作用下切侵蚀加深河床或沟床, 受冲刷的部位随着

物质的蚀离, 向上游源头侵蚀的现象, 又称向源侵蚀。溯源侵蚀主要包括水力侵蚀与重力侵蚀两方面。重

收稿日期: 2013-09-25

修回日期: 2013-11-13

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“黑色岩层黏土化过程的硫化矿物氧化动力学机理研究”(41172261); 四川省科技支撑计划“西南红层地区边坡快速修复技术研究”(2011SZ0178)

作者简介: 王英杰(1988—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土力学。E-mail: wyjingjie0320@163.com。

力与水力侵蚀并不是单独存在的,两者相互作用、相互影响,而重力侵蚀则是造成边坡失稳的直接原因。沟坡下部在雨季形成行洪沟道,由于坡面下部在水流作用下不断下切,沟坡本身将受到水流的强烈侧向冲刷而加大直立面高度,不断下切和加宽的沟道在重力作用下失稳,造成坍塌、滑坡等地质灾害现象。

昔格达地层是分布于中国西南地区的一套半成岩,也是一种工程性质较差的极软岩。昔格达地层分布面积有  $4.00 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要由灰绿色、灰黑色、灰黄色的黏土岩、粉砂质黏土岩和粉砂岩组成<sup>[1]</sup>。目前国内对于昔格达边坡的研究主要集中在昔格达土的物理力学性质及其工程地质特性等方面。如周云金等<sup>[2]</sup>进行攀枝花地区提水设施设计时,分析了昔格达地层的特征;其结构构造不均一,富含黏土颗粒及黏土矿物,具有压缩性较强、遇水软化等特点。黄水亮等<sup>[3]</sup>通过对喇嘛溪沟昔格达土研究认为,其工程地质性质极差,抗压强度和抗拉强度低,软化性强,将直接对雅泸高速公路的修建造成影响。宋建广等<sup>[4]</sup>通过雅攀公路昔格达地层滑坡成因与治理分析认为,昔格达地层与第四纪沉积物有明显的分界面,为滑坡的形成提供了有利的滑动面。

由于昔格达地层土体工程地质性质差,强度低,遇水极易崩解,使得其在降雨作用、河水侧向冲刷以及重力作用下更易发生边坡失稳、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。昔格达地层化学成分丰富,主要含有  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ , 以及少量的  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , 此外还含有一些不稳定化学成分如  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  等<sup>[5]</sup>, 这些化学成分异常活泼,在地下水及地表水的作用下易于发生化学反应,形成次生矿物,影响昔格达土强度,加速边坡的失稳;因此有必要对溯源侵蚀作用下的昔格达土边坡稳定性进行分析,为开展同类分析及研究提供依据及参考。

## 1 溯源侵蚀模型的建立

### 1.1 溯源侵蚀边坡物理概化模型

昔格达地层岩土体风化程度与第四纪冰川黏土相当,总体抗风化能力相对较弱,昔格达地层经过不同程度成岩作用,在尚未成为岩石前又开始风化,目前正处在化学风化的阶段,为溯源侵蚀的发生发展创造了很好的条件。本文将溯源侵蚀发生的单位宽度坡面概化及受力分析如图 1 所示。模型中考虑了边坡土体重力、抗滑力、下滑力还有水流的切应力,同时考虑地下水位的动水压力  $P_w$  对边坡稳定性的影响。

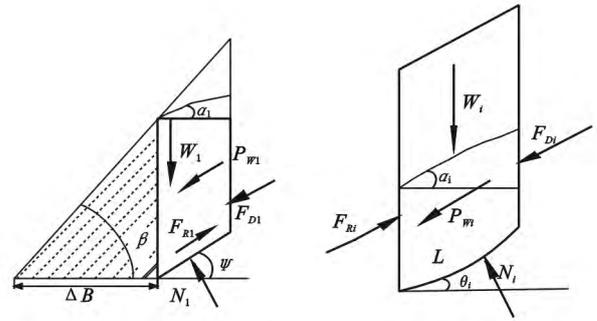


图 1 溯源侵蚀边坡物理概化模型及受力分析

注:  $W$  为边坡土体重力;  $F_D$  为下滑力;  $F_R$  为抗滑力;  $P_w$  为动水压力;  $\Delta B$  为受河水侧向冲刷后退距离;  $\beta$  为自然坡角度;  $\psi$  为垮塌面的倾角;  $\alpha$  为地下水位线倾角;  $\theta$  为滑动面倾角;  $N_1, N_i$  为法向力;  $L$  为滑动长度。

### 1.2 基本公式

昔格达土层富含黏土矿,粉粒和黏粒含量高,具有遇水软化、泥化、脱水崩解的特点<sup>[6]</sup>。因此,物理特性可按具有一定黏结力的黏土考虑。昔格达土层边坡脚下形成的沟道是雨季主要的行洪通道,由于其坡降一般较大,洪峰较为集中,因此水流对坡脚将形成强烈的侧向淘刷。根据唐存<sup>[7]</sup>得出黏土的起动切应力公式,本模型的土体起动切应力应用公式为:

$$\tau_c = 66.8 \times d \times 10^2 + \frac{3.67 \times 10^{-6}}{d} \quad (1)$$

式中:  $\tau_c$ ——土体起动切应力 ( $\text{N/m}^2$ );  $d$ ——边坡土体颗粒有效粒径 ( $\text{mm}$ )。

在给定的时间内,洪水持续对沟坡进行侧向冲刷,冲刷导致的横向后退距离。本文采用 Osman 等<sup>[8]</sup>根据室内模型试验得到的土体单位时间侧向冲刷距离为:

$$\Delta B = \frac{C_l \times (\tau - \tau_c) \times e^{1.3\tau_c}}{\gamma_s} \quad (2)$$

式中:  $\Delta B$ ——土体单位时间受水流侧向冲刷而后退的距离 ( $\text{m}$ );  $\tau$ ——水流与边坡土体间切应力 ( $\text{N/m}^2$ );  $\tau_c$ ——土体起动切应力 ( $\text{N/m}^2$ );  $C_l$ ——与土体理化特征相关系数,根据 Osman 的试验资料可取  $C_l = 3.64 \times 10^{-4}$ 。

坡脚受水流侧向冲刷而后退  $\Delta B$  后,由图 1 所示沟坡将相应产生直立高度,其转折点之上的沟坡高度为:

$$H_1 = H - \Delta B \times \tan \beta \quad (3)$$

式中:  $H$ ——沟坡的自然高度 ( $\text{m}$ );  $H_1$ ——因水流侧向冲刷,直立面前转折点上的沟坡高度 ( $\text{m}$ )。

受侧向冲刷作用,坡脚土体横向后退,边坡稳定性受到影响,在重力作用下,沟坡发生垮塌。此时破坏面与水平面的夹角为:

$$\phi = 0.5 \times \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{H}{H_1} (1 - k^2) \tan \beta \right] + \varphi \right\} \quad (4)$$

式中:  $k$ ——坡面中较大垂直节理或裂隙深度与沟坡高度比值<sup>[9]</sup>, 可根据地质调查确定, 无资料时可取 0.3;  $\varphi$ ——土体摩擦角( $^\circ$ ); 昔格达土边坡无较大垂直节理或裂缝  $k=0$ , 则:

$$\phi = 0.5 \times \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{H}{H_1} \tan \beta \right) + \varphi \right\} \quad (5)$$

## 2 稳定系数求解

### 2.1 下滑力的确定

沟坡下滑力主要由沟坡土体重力、动水压力在破坏面上的分力组成。

(1) 沟坡土体动水压力<sup>[10]</sup>。

$$P_{wi} = \gamma_w V_{2i} \sin \frac{1}{2} (\theta_i + \alpha_i) \quad (6)$$

式中:  $\gamma_w$ ——水的重度( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $\alpha_i$ ——第  $i$  块地下水水位线倾角( $^\circ$ );  $V_{2i}$ ——第  $i$  块滑动体在地下水水位线以下土体体积( $\text{m}^3$ );  $\theta_i$ ——第  $i$  块滑动面倾角( $^\circ$ )。而坡脚处  $\theta_1 = \Psi$ , 通过试算确定最危险滑动面, 进而确定  $\theta_i$ 。其余各量同上。

(2) 沟坡土体的重力。

$$W_{ii} = \gamma_i V_{1i} + \gamma_{si} V_{2i} \quad (7)$$

式中:  $W_{ii}$ ——第  $i$  块土体重力( $\text{N}$ );  $\gamma_i$ ——第  $i$  块土体的自然重度( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $V_{1i}$ ——第  $i$  块滑动体在地下水水位线以上土体体积( $\text{m}^3$ );  $\gamma_{si}$ ——第  $i$  块土体的饱和重度( $\text{N}/\text{m}^3$ ), 其余各量同上。

(3) 沟坡土体下滑力。

$$F_{Di} = W_{ii} \sin \phi_i + P_{wi} \cos(\phi_i - \alpha_i) \quad (8)$$

式中:  $F_{Di}$ ——第  $i$  块土体的下滑力( $\text{N}$ )。其余各量含义同上。

### 2.2 沟坡抗滑力的确定

昔格达土层主要位于中国西南地区, 西南地区降雨量较大, 夏季气温较高, 使得土体地下水水位在较短的时间内发生很大的变化, 因此沟坡土体按非饱和状态确定下滑力。目前饱和土抗剪强度理论已经完善并可以直接用于实际计算中。而非饱和土性质与饱和土相比要复杂的多, 由于土体中水气交界面处张力的存在, 空隙中水与气具有不同的压力, 并且空气水压力通常为负值, 空隙水压力与空隙气压力同时存在, 使土的有效应力不再等于粒间压力, 因此非饱和土抗剪强度理论至今还未形成统一的理论。

目前得到广泛承认的非饱和土抗剪强度的理论的表达式, 由 Fredlund 等<sup>[11]</sup>在 1978 年提出:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi + (u_a + u_w) \tan \varphi_b \quad (9)$$

式中:  $\tau_f$ ——非饱和土抗剪强度( $\text{kPa}$ );  $c'$ ——饱和土体的有效黏聚力( $\text{kPa}$ )与内摩擦角( $^\circ$ );  $\sigma$ ——总应力;  $u_a$ ——空隙气压力;  $u_w$ ——空隙水压力;  $b$ ——由基质吸力引起的吸附角, 其本身又是基质的函数; 按定义式较难应用于实际计算当中。

一种简化处理方法是, 将非饱和土抗剪强度中的黏聚力分为饱和黏聚力和附加黏聚力, 并通过实验得到不同土体附加黏聚力随含水量的变化关系。土体的内摩擦角随含水量变化一般不超过  $\pm 2^\circ$ <sup>[12]</sup>, 因此, 在计算中对于同一土体, 其内摩擦角可以按常数考虑。因此, 非饱和土抗剪强度可近似写为:

$$\tau_f = c' + t' + \sigma \tan \varphi \quad (10)$$

式中:  $\tau_f$ ——非饱和土抗剪强度( $\text{kPa}$ );  $c'$ ——相应于饱和土体的黏聚力( $\text{kPa}$ );  $t'$ ——附加黏聚力( $\text{kPa}$ )。附加黏聚力与含水量之间的幂函数关系<sup>[13]</sup>:

$$\tau' = a \omega^b \quad (11)$$

式中:  $\omega$ ——土体的含水量;  $a, b$ ——幂函数的系数和指数, 可通过实验得到。

另外党进谦根据实验得到非饱和土强度理论, 土的力学性质在很大程度上取决于土的结构, 土颗粒接触点的性质和数量与土天然结构的稳定性直接相关, 得出的非饱和土抗剪强度公式可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi + \tau_s \quad (12)$$

式中:  $\tau_s$ ——不稳定凝聚力( $\text{kPa}$ );  $c$ ——原始凝聚力( $\text{kPa}$ ), 其值等于饱和土的凝聚力。

同一种非饱和土, 不稳定凝聚力与结构强度的比值近似为一常数, 不受初始含水量变化的影响, 取  $\tau_s / q_s \tan \varphi$  的平均值作为常数  $m$ , 即:

$$\tau_s = m q_s \tan \varphi \quad (13)$$

式中:  $m$ ——随土类而变化的参数;  $q_s$ ——非饱和土结构强度( $q_s = A \omega^\lambda$ ,  $A, \lambda$  是由土体性质决定的参数)。因此, 以非饱和土的结构强度代替不稳定凝聚力的抗剪强度公式为<sup>[5]</sup>:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi + m q_s \tan \varphi \quad (14)$$

对比简化处理非饱和土抗剪强度与党进谦非饱和土抗剪强度理论公式(10)和(14)我们可以得到:

$$C = c' + t' = c + m q_s \tan \varphi \quad (15)$$

确定了非饱和土的饱和黏聚力与附加黏聚力后, 即可由图 1 所示的几何关系, 确定沟坡滑动面上所受的抗滑力, 如公式(16)所示:

$$F_{Ri} = \frac{H_i C_i}{\sin \phi_i} + [W_{ii} \cos \phi_i + P_{wi} \sin(\phi_i - \alpha_i)] \tan \varphi_i \quad (16)$$

式中:  $N_i$ ——第  $i$  条块作用在滑动面上的法向力( $\text{N}/\text{m}$ );  $F_{Ri}$ ——第  $i$  条块土体抗滑力( $\text{N}/\text{m}$ );  $L_i$ ——第

$i$  条块滑动体在滑动面上的长度(m);  $C_i$ ——附加黏聚力与有效黏聚力之和由公式(15)确定。

$$N_i = W_{ii} \cos \psi_i + P_{ui} \sin(\psi_i - \alpha_i) \quad (17)$$

### 2.3 沟坡稳定系数确定

$$K_s = \frac{F_R}{F_D} \quad (18)$$

$$K_s = \frac{\frac{C_i H_i}{\sin \psi_i} + [W_{ii} \cos \psi_i + P_{ui} \sin(\psi_i - \alpha_i)] \tan \varphi_i}{W_{ii} \sin \psi_i + P_{ui} \cos(\psi_i - \alpha_i)} \quad (19)$$

式中:  $K_s$ ——沟坡稳定性系数;  $F_R$ ——边坡土体抗滑力(N);  $F_D$ ——沟坡土体下滑力(N), 其余各式同上。

## 3 实例稳定性求解

均质昔格达土边坡, 高 20 m 坡度 1:2。在平均降雨强度为 80 mm/d, 持续降雨 24 h 情况下, 确定该昔格达土边坡的稳定性。其中水流平均切应力为  $\tau = 8.0 \text{ N/m}^2$ 。土体的黏聚力  $c = 10 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $\alpha = 20^\circ$ , 土的容重为  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ 。

由参考文献[5]可知, 昔格达地层的抗侵蚀稳定性与黄土接近, 因此计算参数取黄土参数  $m = 1.457$ 。同时由参考文献[5]可知昔格达土各粒径组直径范围及各粒径组占总粒径的百分比, 通过计算求得土体平均粒径为 0.11 mm。通过试算得到最危险滑动面, 并将滑坡将模型划分为 8 个计算单元。计算模型如图 1 所示。计算时块体之间的作用力忽略不计。

由公式(1)~(3), (5)分别计算得:

$$\tau_c = 0.734 \text{ (N/m}^2\text{)}, \Delta B = 3.06 \text{ (m)}, H_1 = 18.29 \text{ (m)};$$

$$\psi = 23.92^\circ; \lambda = 1.885, \omega = 19.3\%;$$

$$A = 1.29 \times 10^3 \text{ (m}^2\text{)}; q_s = A\omega^3 = 58 \text{ (kPa)}$$

$$\text{由公式(15)得: } C = c + mq_s \tan \varphi = 53 \text{ (kPa)}$$

通过公式(6)~(8), (16)~(17)计算可以得到边坡稳定性参数, 计算结果如表 1 所示。

并通过公式(19)计算得到边坡稳定安全系数:

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^8 \frac{C_i H_i}{\sin \psi_i} + [W_{ii} \cos \psi_i + P_{ui} \sin(\psi_i - \alpha_i)] \tan \varphi_i}{\sum_{i=1}^{10} W_{ii} \sin \psi_i + P_{ui} \cos(\psi_i - \alpha_i)} = 1.139$$

此昔格达土边坡稳定安全系数  $K_s = 1.139$ , 处于基本稳定状态。参考文献[15]为相同条件下的均质黏土边坡, 采用经典 Bishop 法计算得到边坡稳定性安全系数如表 2 所示。

表 1 边坡稳定性参数计算结果

$i$	$P_{ui}$	$W_{ii}$	$N_i$	$F_{Di}$	$F_{Ri}$
1	4.001 19	242.76	241.365	37.668	137.849
2	3.721 38	337.68	331.377	71.574	172.101
3	3.458 12	420.24	405.803	113.630	201.610
4	3.152 31	502.38	475.266	165.881	225.872
5	2.855 56	570.86	526.760	222.222	246.004
6	2.432 80	870.46	800.966	342.530	348.787
7	2.345 24	559.34	480.812	286.984	231.581
8	2.125 65	368.78	302.431	211.924	170.896

注:  $i$  为边坡计算单元编号;  $P_{ui}$  为第  $i$  条块土体动水压力(N);  $W_{ii}$  第  $i$  条块土体重力(N);  $N_i$  第  $i$  条块作用在滑动面上的法向力(N);  $F_{Di}$  为第  $i$  条块土体下滑力(N);  $F_{Ri}$  为第  $i$  条块土体抗滑力(N)。

表 2 稳定安全系数计算结果

计算方法	Bishop 法	数值计算方法
1.139	1.212	1.194

## 4 结论

(1) 昔格达边坡的溯源侵蚀是由土体的重力与水流的侧向冲刷相互作用的复杂过程, 它包括坡脚的水力侵蚀过程和沟坡整体重力侵蚀过程两部分。两个过程相互影响, 加速溯源侵蚀的速度, 而且昔格达土化学成分丰富, 含有一定易溶盐, 破坏土体结构强度, 加速溯源侵蚀的速度。

(2) 本文针对重力侵蚀与水力侵蚀这两个过程, 对沟坡土体受力分析, 建立物理概化模型, 并在非饱和和昔格达土的基础上优化了边坡稳定性计算公式。

(3) 通过实例求解昔格达土边坡的稳定性系数, 所得结果与相同条件下, 均质黏性土边坡采用经典 Bishop 法及数值计算方法求解的边坡稳定性系数相比较小, 能够为边坡的稳定性提供一定的安全储备空间。

(4) 昔格达边坡稳定性在溯源侵蚀的作用下更易失稳。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘惠军, 聂德新. 昔格达地层研究综述[J]. 地球科学进展, 2004(S1): 80-82.
- [2] 周云金, 曾联明. 红格提水工程二级泵站昔格达地层特性及坡体变形成因分析[J]. 水电站设计, 2000, 16(2): 61-65.
- [3] 黄水亮, 巫锡勇, 邓睿. 喇嘛溪沟昔格达地层水岩相互作用的研究[J]. 路基工程, 2010, 148(1): 151-153.
- [4] 宋建广, 孙代. 浅谈雅攀公路昔格达地层滑坡成因与治理[J]. 路基工程, 2007, 134(5): 175-176.

(下转第 33 页)

- 2000,48(1):71-90.
- [3] 程慎玉,张宛洲.土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J].地球科学进展,2003,8(4):597-602.
- [4] 刘立新,董云社,齐玉春,等.应用根去除法对内蒙古温带半干旱草原根系呼吸与土壤总呼吸的区分研究[J].环境科学,2007,28(4):689-694.
- [5] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):115-146.
- [6] Li Hongjian, Yan Junxia, Yue Xiaofeng, et al. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148(3):490-503.
- [7] 陈光水,杨玉盛,王小国,等.格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素[J].生态学报,2005,25(8):1941-1947.
- [8] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confound factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998,4(2):217-227.
- [9] Bond-lamberty B, Wang Chuankuan, Gower S T. Contribution of root respiration to soil surface CO<sub>2</sub> flux in a boreal black spruce chronosequence[J]. Tree Physiology, 2004,24(12):1387-1395.
- [10] Hendricks J J, Nadelhoffer K J, Aber J D. Assessing the role of fine roots in carbon and nutrient cycling[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1993,8(5):174-178.
- [11] 李凌浩,韩兴国,王其兵,等.锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J].植物生态学报,2002,26(1):29-32.
- [12] Wang Wei, Ohse K, Liu Jianjun, et al. Contribution of root respiration to soil respiration in a C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> mixed grassland[J]. Journal of Biosciences, 2005,30(4):507-514.
- [13] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North-Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 1990,28(5):737-745.
- [14] Robertson F A, Myers R J K, Saffigna P G. Respiration from soil and litter in a sown perennial grass pasture[J]. Australian Journal of Soil Research, 1995,33(1):167-178.
- [15] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in missouri[J]. Ecology, 1971,52(5):912-915.
- [16] 姜丽芬,石福臣,王化田,等.东北地区落叶松人工林的根系呼吸[J].植物生理学通讯,2004,40(1):27-30.
- [17] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998,396(6711):570-572.
- [18] 严俊霞,李洪建,尤龙凤.玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(3):183-189.
- [19] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in Eucalyptus pauciflora forest [J]. Plant and Soil, 1997,190(1):127-141.

(上接第 28 页)

- [5] 高芳芳,巫锡勇,邓睿.昔格达地层岩土特性对溯源侵蚀的影响[J].地质灾害与环境保护 2009,20(3):80-84.
- [6] 谯春丽,何昌荣,张文举.昔格达土的动力特性研究[J].四川水利,2003(5):33-36.
- [7] 唐存本.泥沙起动规律[J].水利学报,1963(2):1-12.
- [8] Osman A M, Thome C R. Riverbank stability analysis (I): theory[J]. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1988,114(2):134-150.
- [9] 王广谦,薛海,李铁键.黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型[J].应用基础与工程科学学报,2005,13(4):335-344.
- [10] 中华人民共和国.建筑边坡工程技术规范 GB50330—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [11] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated 50115 [J]. Canadian Geotechnical, 1978,15(2):313-321.
- [12] 卢肇钧.粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J].土木工程学报,1999,32(4):3-9.
- [13] 党进谦,李靖.非饱和黄土的强度特征[J].岩土力学工程学报,2001,19(2):56-61.
- [14] 党进谦,李靖.非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J].水利学报,2001(7):79-83.
- [15] 朱宝龙,郭进军,文华,等.土力学[M].北京:中国水利水电出版社,2011:211-213.