

非饱和黄土的土水特征曲线试验研究

郑娟¹, 赵丽娅², 刘保健¹

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 石家庄经济学院 勘查技术与工程学院, 石家庄 050031)

摘要: 采用压力膜仪对非饱和和重塑土在不同干密度下的土水特征曲线进行了研究。试验结果表明: 试样干密度越小, 低吸力段曲线斜率变化越大, 残余含水率越低, 持水能力越差。随着吸力增加, 其含水率随基质吸力增大而减小的幅度越来越小, 最后趋于平缓。采用幂函数对获取的数据进行拟合, 拟合效果较理想。对比 VG 模型, 吻合度较高。同时, 采用微型贯入仪对每级吸力作用下的土样进行贯入试验, 获取基质吸力与地基承载力、液性指数及压缩模量的关系。

关键词: 非饱和土; 压力膜仪; 基质吸力; 土水特征曲线; 数据拟合; 幂函数; VG 模型; 微型贯入仪

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 06-1138-05

Experimental study on soil water characteristic curves of unsaturated loess

ZHENG Juan¹, ZHAO Li ya², LIU Bao jian¹

(1. Highway Institute, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Exploration Technology and Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Pressure plate extractor is used to study the soil water characteristic curve of unsaturated remolded soil under different dry densities. The results showed that (1) when the sample has smaller dry density, the slope of soil water characteristic curve has higher variation during the low suction segment, the residual water rate is lower, and the moisture holding capacity is worse; (2) with the increase of suction, the decreasing range of moisture content becomes smaller with the increase of matrix suction and tends towards stability; (3) the power function has good results to fit the obtained data obtained; and (4) the soil water characteristic curve results are similar to those tested by VG model. At the same time, penetration tests were carried out for the soil samples under each suction effect using the micro penetrometer, and the relationships between matric suction and bearing capacity of the foundation, liquid index, and compression modulus were obtained.

Key words: unsaturated soil; pressure plate extractor; matrix suction; soil water characteristic curve; data fitting; power function; VG model; micro penetrometer

土水特征曲线 (swcc) 是表示非饱和土的吸力与含水率的关系曲线, 根据土水特征曲线可以确定非饱和土的许多重要信息, 如渗透系数, 抗剪强度^[1-3]等, 在工程应用中有十分重要的意义。

已有的研究大多数将重点放在描述各种因素对于土水特征曲线大致趋势的影响^[4-8], 而实际上非饱和土的基质吸力随含水率的变化呈现出明显的阶段化特征。由此, 本文对非饱和和重塑土在不同干密度情况下不同阶段的土水特征曲线进行了研究, 并采用形式简单、物理意义明确的幂函数对试验数据进行了拟合。同时, 通过微型贯入仪于每级吸力作用下做贯入试验, 建立基质吸力与地基承载力、液性指数及压缩模量的关系。

1 试验方法

本试验采用的仪器是由美国土壤水分仪器公司生产的 5 bar 压力膜仪。试验装置由气压源、控制系统、压力室和排水系统组成。采用空气压缩机作为气压源。压力膜仪内的陶瓷板与大气连通可保持水压力为零, 则基质吸力值 S (负压) 与所加气压值 (正压力) 在数值上完全相等。

土样为黄土, 液限为 29.8%, 塑限 19.5%, 塑性指数 10.3。过筛后用自制的压样盒压样获取不同干密度的土样, 用真空泵进行抽气饱和。对陶瓷板在密闭的提取器内利用空压机加压进行饱和。

试验中利用空压机施加压力。随着压力增加, 外流管开

始排水。在外流管口处放置一量筒,若量筒内水面读数长期没有变化,可认为达到了平衡状态。平衡后,称量土样质量 m ,以测定其含水率变化。本试验中依次施加的吸力为 20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、120 kPa、150 kPa、180 kPa、240 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa。将每级吸力下的平衡质量记为 m_i ,利用公式 $\theta_i = (m_i - \rho_d V) / V$ 计算每级基质吸力对应的体积含水率。则可绘制 $\theta-s$ 的土水特征曲线图。

与此同时,为了研究基质吸力与土样其他物理性质指标

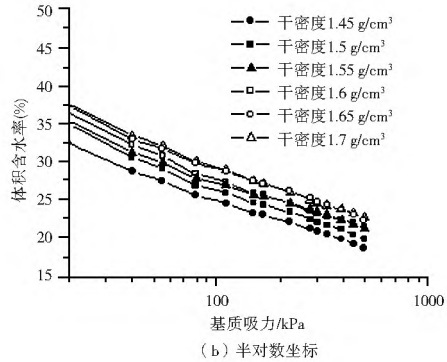
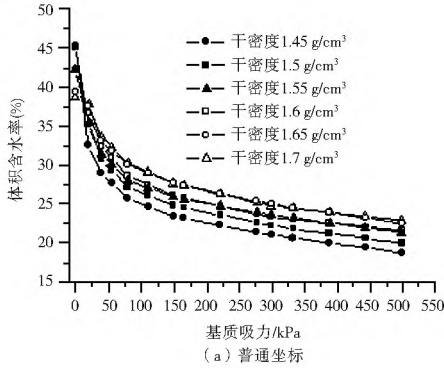


图 1 土水特征曲线

Fig. 1 Soil water characteristic curve

从图 1(a)可以看出,干密度较小的试样曲线前段的斜率较大,空气进入值小,容易排水。说明试样孔隙较大,孔隙水易排出。而残余含水率偏低,说明土样持水能力较差。而干密度相对较大的试样,曲线较为平缓。说明干密度较大时,试样孔隙相对较小,并可能存在一定量的微孔隙,其中的水不易排出,导致水排出速率较慢,土水特征曲线斜率较小。且试样趋于稳定的体积含水率值较大,说明干密度越大,残余含水率大,则持水能力较强。

本试验为脱湿阶段,根据非饱和土理论,土的脱湿过程一般可以分为边界效应段、转化段和非饱和残余段^[9]三部

及力学性质指标之间的关系,在每级吸力施加测定含水率后,用自行研发的微型贯入仪快速测定该土样的地基承载力 R ,压缩模量 E_s 及液性指数 I_L 。可按每级吸力绘制各指标变化曲线,分析其意义所在。

2 试验结果与分析

2.1 土水特征曲线定性分析

依据试验得到的数据绘制出土水特征曲线(见图 1)。

分。从图 1(b) 半对数坐标中的数据显示,本试验属于边界效应段和转化阶段,未进入残余阶段。

而根据含水率随着基质吸力增大而减小的幅度大小可将转化阶段划分为两段:第一转化阶段和第二转化阶段。从图 2 显见,吸力 0~80 kPa 阶段含水率随着基质吸力增大而减小的幅度较大。因为该阶段土颗粒接触点处的水膜是连续的,而孔隙气则以分散的气泡形式被包裹在孔隙水中。由于排水路径较为通畅,故排水速度较快。且很明显,在较饱和状态下,干密度越大的试样其体积含水率越小。

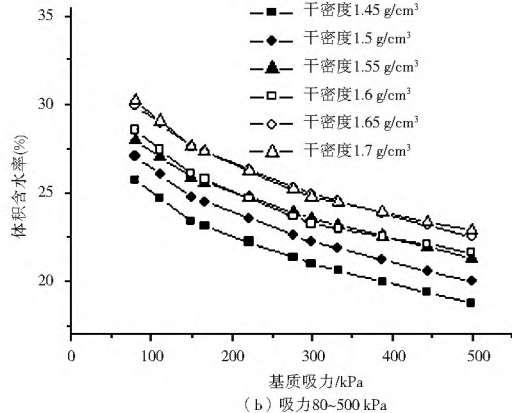
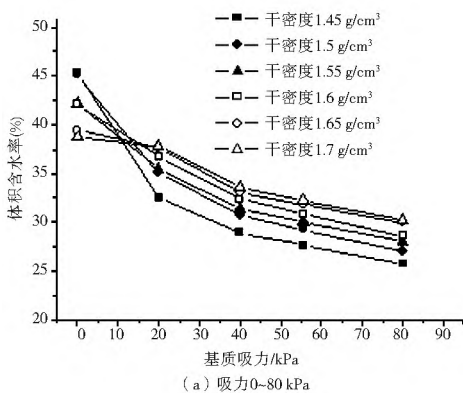


图 2 不同阶段的土水特征曲线

Fig. 2 Different stages of soil water characteristic curve

而 80~500 kPa 阶段含水率随基质吸力增大而减小的幅度较前一阶段要小得多。原因是,此阶段孔隙水和孔隙气相互分隔,使得排水通道不连续,且受到分散气体的阻碍,故排水较慢。Jotisankasa 等^[10]认为在较高基质吸力下,土水特征曲线对土体结构特性的依赖将减小,而更趋于均匀。从上图可见,基质吸力增大曲线的斜率逐渐减小,体积含水率变

化态势稳定。

2.2 土的干密度与土水特征曲线公理化分析

2.2.1 包含干密度的土水特征曲线拟合公式

通过对该试验得到的土水特征曲线进行分析,发现采用幂函数对其进行拟合,其吻合程度较理想。

$$\theta = aS^b \quad (1)$$

式中： θ 为体积含水率； S 为基质吸力； a 、 b 为拟合参数。其中， a 与初始体积含水率有关， a 值越大初始含水率越小； b 是与曲线初始斜率有关的量，体现曲线的“平坦”程度，定义 b 为体积含水率随基质吸力的变化值。且 b 为负值，说明随着吸力的增加，含水率呈减小趋势。进一步分析函数，将 S 取一较大值，可取 $S = 10\ 000\ \text{kPa}$ ，这时对应的 θ 值可作为残余含水率。代入计算所得的残余含水率随着干密度增加而增加，与实测结果相符合。

为体现出干密度对土水特征曲线的影响，将曲线拟合方程中的参数 a 、 b 与干密度进行回归分析，发现随着干密度增加 a 逐渐减小，说明初始含水率随着干密度的增加而减小，原因是干密度增加导致孔隙变紧密^[11-12]；体积含水率随基质

吸力的变化值 b ，其绝对值随着干密度增加而减小，说明干密度增加曲线变得“平坦”，体积含水率随基质吸力增加而减小的幅度变小，表明干密度的增加使得孔隙变得紧密且均匀。

将干密度与 a 、 b 值之间拟合得到的函数关系式代入式(1)中，得到干密度 ρ_d 、基质吸力 S 和体积含水率 θ 之间的函数表达式，见式(2)。显然，任意已知干密度、基质吸力和体积含水率中的一个值，就可以确定另外两个值之间的对应关系。

$$\theta = f(S, \rho_d) = (25.05\rho_d + 17.15) S^{(-0.131 - 224.07 \times 0.00232\rho_d)} \quad (2)$$

用上述函数关系式计算得到的数据与试验实测的数据进行对比，见图 3。可见，两者数据吻合较好，说明该模型可以用来描述基质吸力、体积含水率和干密度之间的关系，并且拟合效果较理想。

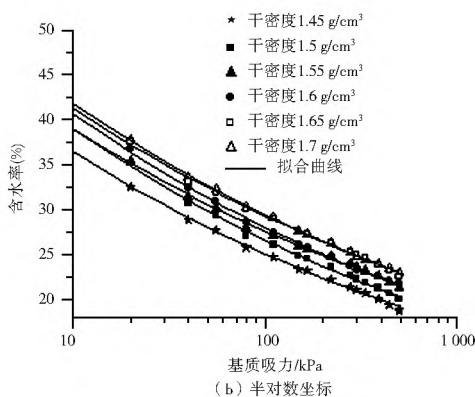
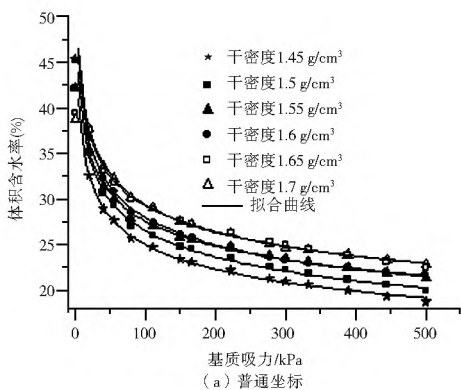


图 3 土水特征曲线拟合

Fig. 3 The fitting of soil water characteristic curve

对(2)式进行数学变换，得到式(3)如下：

$$S = f(\theta, \rho_d) = \left(\frac{\theta}{25.05\rho_d + 17.15} \right)^{\frac{1}{-0.131 - 224.07 \times 0.00232\rho_d}} \quad (3)$$

式(3)用干密度 ρ_d 和体积含水率 θ 表示出基质吸力，更有实用意义。由于体积含水率 θ 和干密度 ρ_d 是存在的事实，可运用上式预估基质吸力 S 的值。而体积含水率 θ 和干密度 ρ_d 的变化导致基质吸力 S 的变化，由于函数是单调的，甚至可通过上式预估基质吸力 S 的变化值，进一步间接得到强度的变化。

2.2.2 与同类型模型的对比验证

对于非饱和土，土水特征曲线的数学模型并不唯一^[13-14]。由于非饱和土性质非常复杂，目前尚无理想的理论模型，常用的模型一般为经验模型。如 VG 模型和 Fredlund 4 参数模型及 Fredlund 3 参数模型。其中 VG 模型为幂函数形式，与本文提出的模型类型一致，其关系式如下：

$$\theta - \theta_r / \theta_s - \theta_r = F(S) = 1 / [1 + (aS)^n]^{(1-1/n)} \quad (4)$$

式中： a 、 n 为拟合参数。 θ 为体积含水率， S 为基质吸力， θ_r 为残余含水率， θ_s 为饱和含水率。参数 a 与进气值有关，而参数 n 与土样结构有关，控制着土水特征曲线的斜率。

对本文试验测得的数据用 VG 模型进行拟合，其相关系数 R^2 均在 0.98 以上，吻合度较高。以干密度为 $1.7\ \text{g/cm}^3$ 的试样为例，用 VG 模型拟合的参数 $a = 0.015$ ， $n = 2.2$ ， $\theta_r = 45.32\%$ ， $\theta_s = 19.15\%$ 。拟合结果见图 4，并与用本文提出的模型进行对比，可以看到应力水平较高段的吻合度较高。说明排水量在这一阶段较为稳定，符合模型规律，从而验证了本文模型的适用性。

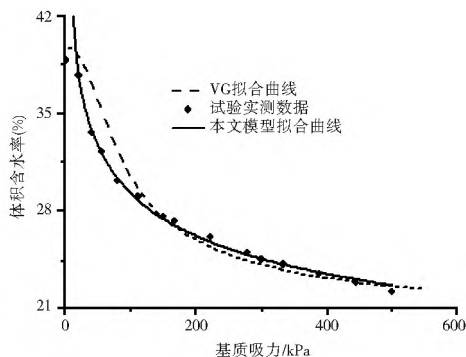


图 4 VG 模型与文中模型的拟合对比

Fig. 4 Comparison of the fitting between VG model and the model in this paper

2.3 基质吸力与其他物理指标的关系

用微型贯入仪对每级吸力施加后的土样进行测定，得到基质吸力与地基承载力 R 、压缩模量 E_s 及液性指数 I_L 之间的关系，以干密度为 $1.7\ \text{g/cm}^3$ 为例绘制见图 5。

从图中不难发现，贯入阻力 P 、地基承载力 R 及压缩模量 E_s 均随着基质吸力的增大呈增大趋势，这与理论分析是一致的。随着基质吸力的增加，土中水排出，土样变密实，使得贯入阻力增大，压缩模量增加，从而承载力提高。

为进一步了解吸力施加的时间与各指标的变化关系，分别将每级吸力保持 1 d 和 2 d 进行对比，以液性指数为例，绘制见图 6，图 6(a) 为吸力保持 1 d 的测定结果，图 6(b) 为稳定 2 d 的测定结果。

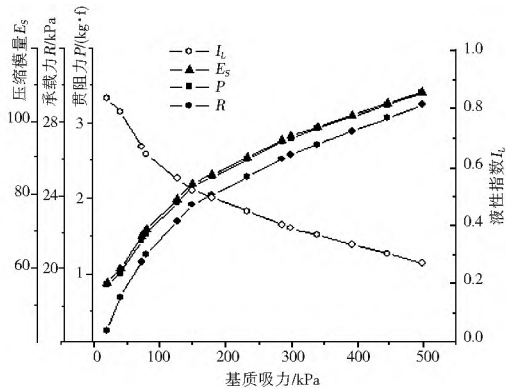


图5 基质吸力与各物理指标的关系

Fig. 5 Relationship between matric suction and each physical indicator

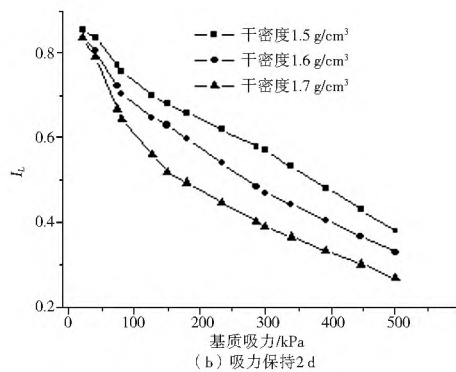
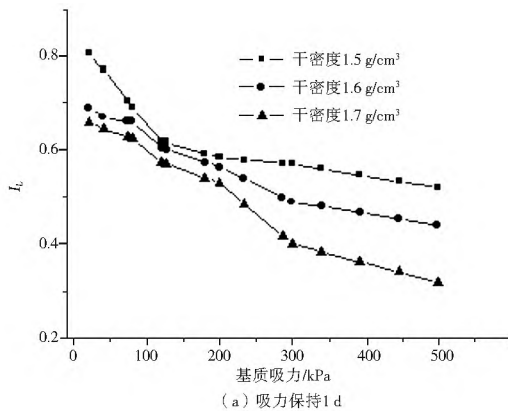


图6 基质吸力与贯入阻力的关系

Fig. 6 Relationship between matric suction and penetration resistance

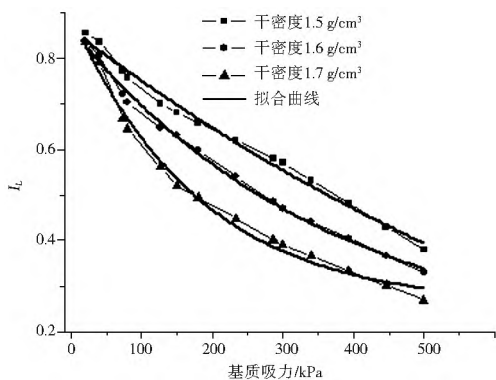


图7 基质吸力与液性指数拟合曲线

Fig. 7 The curve fitting of matric suction and liquid index

率越大,排水越快,残余含水率越低,持水能力较差。而干密度越大,曲线越平缓,持水能力越好。

(2) 对于不同阶段而言,第一转化阶段含水率随基质吸力增大而减小的幅度较大。干密度越小含水率的变化趋势越明显。第二转化阶段含水率变化态势趋于稳定。残余阶段曲线很平缓,干密度越大残余含水率越大,试样的持水能力越强。

(3) 采用幂函数对试验数据进行拟合,分析拟合参数与干密度之间的关系,得到干密度、基质吸力和体积含水率三者之间的函数关系 $\theta = f(S, \rho_d)$ 。将同为幂函数的VG模型对实测数据的拟合结果与本模型对实测数据的拟合对比,发

从整体趋势来看,干密度越大液性指数越小。吸力保持1 d的变化曲线呈发散状,说明在每级吸力作用下排水并未结束,受到未排出孔隙水流动的影响,处于不稳定状态^[15-16]。而吸力保持2 d的变化曲线呈现一定的规律性,可以认为在该级吸力下排水已经完成,因而不同干密度下液性指数随基质吸力的变化走势趋于一致。

进一步对曲线进行拟合,发现均能符合某类基本函数型式,且拟合度较高,限于篇幅,仅将基质吸力与液性指数 L_i 的拟合曲线绘制见图7,其拟合函数符合 $y = a - b \cdot c^x$ 的基本型式。

3 结论

(1) 对于整体趋势而言,干密度越小,低吸力段曲线斜

现吻合度较理想,说明该模型拟合效果较好,简单实用。在已知干密度和体积含水率情况下,可运用函数变换得到 $S = f(\theta, \rho_d)$,从而对基质吸力可进行预估。

(4) 利用微型贯入仪对每级吸力施加后的土样进行贯入试验,测得吸力与地基承载力、压缩模量及液性指数之间的关系,发现存在一定规律,可用标准函数进行拟合。

参考文献(References):

[1] Fredlund D G, Xing A Q, Fredlund M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil water characteristic curved [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440-448.

[2] Jotisanaka A, Vathananukij H, Coop M R. Soil water retention curves of some silty soils and their relations to fabrics [C]// Unsaturated Soils: Theoretical and Numerical Advances in Unsaturated Soil Mechanics Proceedings of the 4th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils. Newcastle: CRC Press, 2010: 263-268.

[3] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect of soil suction [J]. Can Geotech J. 1996, 33(3): 347-392.

[4] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 重塑非饱和黏土的土水特征曲线及其影响因素研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 751-756. (WANG Dong lin, LUAN Maotian, YANG Qing. Merit. Experimental study of soil water characteristic curve of remolded unsaturated clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 751-756.

- (in Chinese)
- [5] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和和粘土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302-3306. (LIU Xiaowen, CHANG Lijun, HU Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3302-3306. (in Chinese))
- [6] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915-1918. (GONG Biwei, WU Hongwei, WANG Bin. Influence of stress states on soil water characteristics of expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1915-1918. (in Chinese))
- [7] GALLAGE C P K, UCHINI J R A T. Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(1): 161-172.
- [8] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土水特征曲线影响规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1463-1468. (ZHANG Xuedong, ZHAO Chengang, CAI Guoqing, et al. Research on influence of soil density on soil water characteristic curve [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1463-1468. (in Chinese))
- [9] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soil mechanics[M]. New York: Wiley Inter, 1993.
- [10] 卢靖, 程彬. 非饱和黄土土水特征曲线的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1591-1592. (LU Qing, CHEN Bin. Research on soil water characteristic curve of unsaturated loess [J]. Chinese Journal of geotechnical engineering, 2007, 29(10): 1591-1592. (in Chinese))
- [11] 刘艳华, 龚壁卫, 苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002, 12(3): 8-12. (LIU Yanhua, GONG Biwei, SU Hong. Study on Characteristic Curve of Soil and Water for Unsaturated Soil [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002, 12(3): 8-12 (in Chinese))
- [12] 关亮, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和和重塑黄土的三轴试验研究[J]. 工程勘察, 2011(11): 14-18. (GUAN Liang, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. Study of the tri axial experiment for the remodeled unsaturated loess [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2011(11): 14-18. (in Chinese))
- [13] 姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的思考[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 67-70. (YAO Hailin. Some considerations about the concept of matric suction and questions related to matric suction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 67-70. (in Chinese))
- [14] 毛尚之. 非饱和膨胀土的土水特征曲线研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 129-134. (MAO Shangzhi. A Study on soil water characteristic curve of unsaturated soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 129-134. (in Chinese))
- [15] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生. 重塑黏性土的基质吸力与土水分及密度状态的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 321-327. (XIONG Chenren, LIU Baochen, ZHANG Jiasheng. Relation of Matric Suction with Moisture State and Density State of Remolded Cohesive Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 321-327. (in Chinese))
- [16] 吴礼舟, 黄润秋. 膨胀土开挖边坡吸力和饱和度的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 970-973. (WU Lizhou, HUANG Runqiu. Study on suction and saturation of excavated expansive soil slope [J]. Chinese Journal of geotechnical engineering, 2005, 27(8): 970-973. (in Chinese))

(上接第 1092 页)

- [12] 曹云生, 高国军, 陈丽华, 等. 南水北调北京段 PCCP 工程植被恢复效果[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 69-72. (CAO Yunsheng, GAO Guojun, CHEN Lihua, et al. Study on vegetation restoration effect along PCCP project in Beijing section of south to north water transfer project [J]. South to north water transfers and water science & technology, 2014, 12(3): 69-72. (in Chinese))
- [13] 张新时. 中国山地植被垂直带基本生态地理类型[M]. 北京: 科学出版社, 1994. (ZHANG Xunshi. The principle ecological geographic types of mountain vertical vegetation belt systems in China [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese))
- [14] 张学珍, 郑景云, 何凡能, 等. 1982-2006 年中国东部秋季植被覆盖变化过程的区域差异[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1): 28-37. (ZHANG Xuezheng, ZHENG Jingyun, HE Faneng, et al. Spatial differences of variations in autumn fractional vegetation coverage in Eastern China during 1982-2006 [J]. Journal of natural resources, 2013, 28(1): 28-37. (in Chinese))
- [15] 於琰, 李克让, 陶波, 等. 植被地理分布对气候变化的适应性研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1326-1332. (YU Li, LI Kerang, TAO Bo, et al. Simulating and assessing the adaptability of geographic distribution of vegetation to climate change in China [J]. Progress in geography, 2010, 29(11): 1326-1332. (in Chinese))
- [16] 韩秀珍, 李三妹, 罗敬宁, 等. 近 20 年中国植被时空变化研究[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 753-759. (HAN Xiuzhen, LISanmei, LUO Jingning, et al. Study on spatiotemporal change of vegetation in china since 20 years [J]. Arid zone research, 2008, 25(6): 753-759. (in Chinese))
- [17] 袁传武, 史玉虎, 陈静涛, 等. 鄂西三峡库区主要森林植被空间分布及影响因素[J]. 湖北林业科技, 2008(153): 1-6. (YUAN Chuangwu, SHI Yuhu, CHEN Jingtao, et al. Spatial distribution of main forest vegetation and influencing factors in Three Gorges Reservoir Region of Western Hubei [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2008(153): 1-6. (in Chinese))
- [18] 邹春静, 徐文铎. 中国东北植被生态学研究的焦点问题[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1711-1721. (ZOU Chunjing, XU Wenye. Key problems in ecological research on vegetation in Northeast China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2004, 15(10): 1711-1721. (in Chinese))
- [19] 於琰, 李克让, 陶波. 植被地理分布对气候变化的适应性研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1326-1332. (YU Li, LI Kerang, TAO Bo. Simulating and assessing the adaptability of geographic distribution of vegetation to climate change in China [J]. Progress In Geography, 2010, 29(11): 1326-1332. (in Chinese))