

文章编号: 1673-9469(2017)04-0064-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.015

大直径盾构隧道下穿南水北调干渠施工影响分析

李新臻¹, 杜守继¹, 孙伟良^{1,2}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 河南铁路投资有限责任公司, 河南 郑州 450010)

摘要: 以豫机城际铁路隧道下穿南水北调中线干渠为背景, 通过 FLAC3D 三维数值模拟, 对施工过程进行模拟, 研究结果表明当隧道顶部距离干渠底部 32.24 m 开挖时, 干渠结构相对稳定; 当地层损失率控制在 0.5% 以内及覆土厚度大于 2 倍洞径时, 地表沉降较小; 随着地层损失率增大, 地表沉降增大, 随着覆土厚度增大, 地表沉降减小。将数值模拟结果与经验公式预测结果进行比较, 结果显示二者吻合度较高。

关键词: 南水北调干渠; 大直径盾构隧道; 沉降预测; 数值模拟; 对比分析

中图分类号: TV68

文献标识码: A

Analysis of large diameter shield tunneling crossing underneath existing trunk canal of South-to-North Water Transfer Project

LI Xinzhen¹, DU Shouji¹, SUN Weiliang^{1,2}

(1. Shanghai Jiao Tong University, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai 200240, China; 2. Henan Railway Investment Limited Liability Company, Zhengzhou 450010, Henan, China)

Abstract: The present article investigates the trunk canal of South-to-North Water Transfer Project constructed beneath the “Yu-ji” railway tunnel and crossing it. The three-dimensional numerical simulation FLAC3D is carried out to simulate the construction process, the results show that the canal structure is relatively stable when the distance between the top of the tunnel and the bottom of the trunk is about 32.24m. Besides the displacement becomes small when the ground loss rate is controlled at 0.5% or the overburden thickness is more than twice the diameters. It was also demonstrated that the displacement increases with the increase of ground loss rate, while it decreases along with the increase of soil thickness. The results of numerical simulation are compared with the empirical formula, and the results show that they are of high agreement.

Key words: Trunk Canal of South-to-North Water Transfer Project; Large Diameter Shield Tunneling; settlement prediction; numerical simulation¹; contrastive analysis

南水北调工程是改善我国水资源配置的一项关键工程, 目前南水北调中线干渠已通水运营, 盾构下穿施工风险大。对大直径盾构隧道下穿南水北调干渠的施工影响进行研究十分必要。杨喜等^[1]通过 Madis/GTS 三维数值模拟, 研究了间距及覆土厚度等因素对地铁隧道下穿南水北调干渠的施工影响。朱永全等^[2]以热力隧道下穿南水北调中线干渠为背景, 介绍了建设过程中位置关系、施工变形、防洪与防渗等设计处理措施。谢文斌等^[3]主要分析了大

直径泥水盾构下穿钱塘江大堤引起的地层沉降的实测数据; 黄平等^[4]采用经验公式与实测数据相结合的方法, 研究了盾构隧道施工引起的地表变形控制的关键问题。张印涛等^[5]运用 FLAC3D 模拟了盾构隧道的掘进过程, 数值模拟结果与实测数据的对比表明, FLAC3D 模型能有效地反映沉降规律。目前, 大直径盾构隧道下穿南水北调干渠结构的研究相对较少, 本文以新郑机场至郑州南站城际铁路隧道下穿南水北调干渠工程为背景, 研究大直径盾构隧道

收稿日期: 2017-09-23

基金项目: 河北省科技厅科技计划项目(16215408D); 河南郑州机场城际铁路有限公司科技项目(2017-1)

作者简介: 李新臻(1994-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 主要从事隧道及地下工程方面的研究。

不同施工条件产生的地层沉降及对南水北调干渠结构造成的影响。其对大直径隧道下穿沟渠的设计施工有重要意义。

1 工程概况

新郑机场至郑州南站城际铁路自新郑机场 T2 航站楼城际铁路车站引出，向东下穿南水北调中线总干渠后，向南出地面引入新建的郑州南站，在 DK41+600~DK50+346 段以隧道、路基、桥梁形式穿越南水北调中线工程一、二级水源保护区共 8.74 km。其中 DK41+750~DK45+550 段采用盾构法施工，盾构直径为 12.81 m，盾构段全长 3 800 m。隧道盾构段于 DK44+420~DK44+920 段穿越一级水源保护区，于 DK44+620~DK44+720 与南水北调中线干渠交叉，隧道轴线与干渠中心线交叉角度约为 90°，交叉里程约为 100 m。下穿方案如图 1 所示。

场地地貌属于平原区，场地地形平坦、开阔，局部略有起伏，地层为第四系冲积层，岩性主要为粉质黏土、粉土、粉细砂，局部表层存在人工填土等特殊岩土。

盾构下穿既有南水北调中线干渠，标准渠低宽 30.39 m，水面平均宽 80.09 m，渠口平均宽 90.59 m，堤宽 5.1 m，渠底高程 115.10 m，设计水位 122.10 m，设计水深 7 m，纵比 1/25 000。根据交叉处地面高程和总干渠设计要素，交叉处总干渠为挖方断面，挖深约为 8.4 m。

盾构隧道洞身大部分处于粉质黏土层中，局部地段穿越粉砂、细砂、隧道埋深较深，隧道断面为圆形。衬砌环外径 12 400 mm，内径 11 300 mm，管片幅宽 2 000 mm，管片厚度 550 mm。

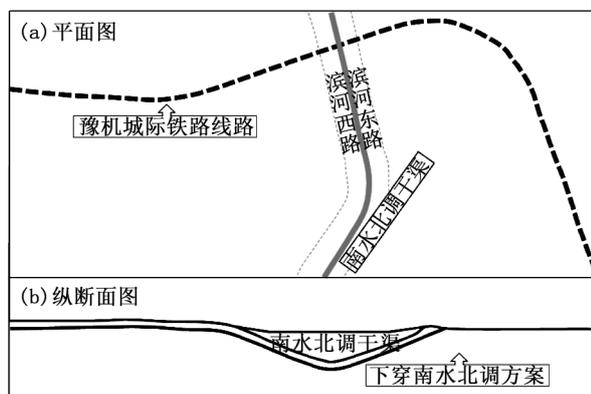


图 1 盾构隧道与南水北调干渠交叉平纵断面

Fig.1 Relationship between Metro tunnel and trunk canal

2 盾构掘进地表沉降计算方法

20 世纪中期，Peck (1969)^[6] 对 20 多个隧道工程的监测数据进行研究，发现，高斯曲线可以很好地拟合盾构掘进引起的横向地表沉降，并推导出了横向地表沉降的计算公式：

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{\pi R^2 \eta}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

$$i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \phi/2)} \quad (3)$$

式中， i 为隧道中心线距沉降槽曲线的反弯点的距离； S_{\max} 为与隧道轴线垂直的最大的地表沉降量； $S(x)$ 为与隧道轴线相距 x m 的地表沉降值； Z 为隧道中心轴线的埋深； V_s 为单位长度土体损失量； η 为地层损失率。

Peck 公式以及在此基础上发展出的一系列的 Peck 修正公式在目前的工程计算中应用较为普遍。Celestino (2000)^[7] 收集了全世界 50 多个隧道施工监测数据，发现近 80% 的实测沉降槽曲线满足高斯曲线形式。O'Reilly 和 New(1982)^[8] 总结了 35 个隧道工程的监测数据，在 Peck 的基础上提出隧道中心线距沉降槽曲线的反弯点的距离 i 的简化计算公式：

$$i = K \cdot Z \quad (4)$$

式中， K 为沉降曲线宽度计算系数。O'Reilly 和 New 得出，对于砂性土浅埋隧道， K 可取 0.2~0.3；对于粘性土， K 可取 0.4~0.7；对于软塑到可塑的软黏土， K 可取 0.2~0.35。

3 数值模型建立

3.1 数值模型尺寸

采用 FLAC3D 数值方法，建立盾构隧道、干渠结构与周围地层的相互作用模型进行数值模拟。隧道外径为 12.4 m，隧道顶部距干渠底部为 38.44 m，覆土厚度为 47.06 m，取模型上表面为地表，考虑土体的无限性及盾构施工扰动影响范围，取横向范围 4D；下边界取隧道底部以下 3D；纵向开挖长度取 180 m。为加快计算速度且模型为对称模型，建立 1/2 三维数值计算模型，尺寸为 60 m × 100 m × 180 m（长 × 宽 × 高）的区域，所建计算模型网格共划分 30 816 个六面体单元，33 761 个节点，90 个开挖步。数值模型如图 2。

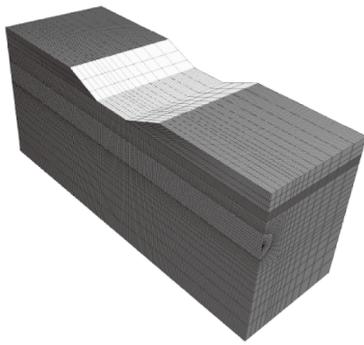


图2 数值模型
Fig.2 Numerical model

盾构隧道的施工过程中,盾尾空隙由盾壳厚度、建筑空隙、刀盘超挖间隙组成^[9]。在数值模拟中,为了较为真实地模拟注浆过程,会设置注浆等代层,通过改变等代层的物理力学参数来模拟注浆体的物理性质变化过程。盾构施工造成的地层损失,则通过设置地层损失层进行模拟^[10]。各层之间的关系如图3。

3.2 本构模型及材料参数

模型上面为地表,取为自由边界;模型侧面为位移边界,限制水平移动;底部为固定边界,限制水平移动和垂直移动。模型各部分均采用实体单元模拟,干渠内的水作为水荷载施加,材料强度准则

采用 Mohr-Coulomb 弹塑性屈服准则。根据地质勘查资料,隧道穿越地层自上而下依次为粉土、粉砂、粉质黏土、细砂、粉质黏土,各土层物理力学参数如图4。衬砌及干渠结构采用钢筋混凝土结构,混凝土的强度等级为 C50,弹性模量为 3 450 MPa,泊松比为 0.2。

3.3 模拟工况

隧道采用泥水平衡盾构机掘进施工,盾构隧道开挖过程中,盾构机刀盘转速、推力及盾构姿态的变化,都会引起土体地层损失率的变化,从而对周围环境造成扰动^[11-12]。对地层损失率的取值,Attewell^[9]建议粘土地区取 0.5%~2.5%,由地质资料,郑州地区的平均地层损失率约为 0.25%~1.5%。为了减小施工难度和节约施工成本,对不同覆土厚度的施工影响进行研究也十分必要。综上,设置的模拟工况为:(1)覆土厚度一定,地层损失率为 0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、1.25%、1.5% 条件下隧道开挖造成的施工影响;(2)地层损失率一定,盾构隧道顶部距干渠底部距离为小于 1D、1D、1.5D、2D、大于 2D(D 为隧道直径)条件下隧道开挖造成的施工影响。

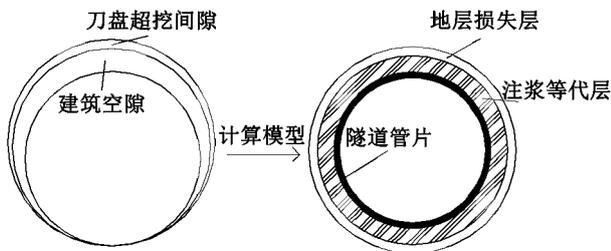


图3 数值模拟计算示意图
Fig.3 Sketch of numerical simulation

3.4 数值模拟过程

初始地应力平衡时,忽略构造应力而只考虑土体重力。初始地应力平衡之后,将位移归零。使用 null 命令进行干渠开挖,然后激活渠底渠侧单元模拟干渠结构,最后施加水荷载于干渠结构。在 FLAC3D 中,用 null 命令来实现土体的开挖,随后引入盾壳单元属性,在隧道开挖面施加面力用来模拟开挖面支护力,然后进行计算;达到一定开挖步后,对周围等代层赋予注浆材料的属性和衬砌单元的属性,模拟管片拼装和壁后注浆;隧道总长为 180 m,每次掘进 1 环长度,为 2 m,盾构从 y=0 m 推进至 y=180 m,分 90 步进行开挖。

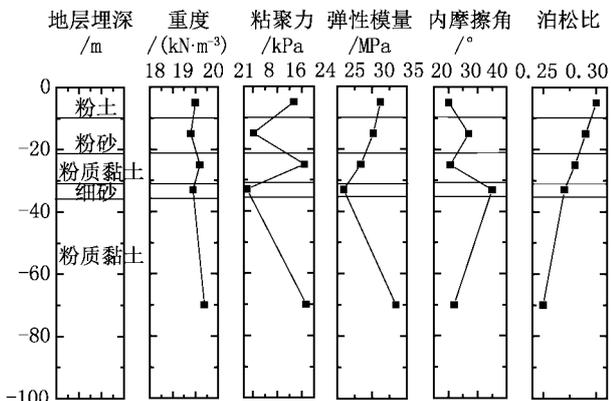


图4 隧道区间各土层主要物理参数
Fig.4 Physical parameters of soil in the interval

4 数值模拟结果分析

4.1 盾构开挖的施工影响

图5和图6分别为开挖面顶部距干渠底部 32.24 m (设计值)条件下,隧道开挖完成后区域内竖向位移云图和地层竖向应力云图。由图5可以看出,盾构施工对区域内竖向地表沉降影响明显,形成明显

的沉降槽，最大地表沉降约 7 mm，干渠结构最大沉降约为 6.2 mm，满足南水北调干渠沉降控制指标 (-10 mm~3 mm)；由图 6 可以看出，在自重应力作用下，土层应力场基本水平分布，隧道开挖对地层的扰动范围较小，约在 2 倍洞径以内。说明隧道施工完成后，周边土体基本稳定。

由图 7 和图 8 可以看出，干渠结构最小主应力为压应力，位于盾构开挖面上方的渠底处，值为 -5.4 MPa；干渠结构最大主应力为拉应力，位于远离盾构开挖面的渠底处，为 1.8 MPa，小于 C50 混凝土抗拉强度标准值 2.64 MPa，干渠结构安全。

4.2 不同地层损失率和覆土厚度条件下的施工影响

图 9 为覆土厚度一定，不同地层损失率条件下的地表沉降，可以看出：随着地层损失率的增加，地表沉降也增大；当地层损失率控制在 0.5% 以内时，地表沉降小于 10 mm；当地层损失率为 1.5% 时，最大地表沉降为 32 mm。同时，随着地层损失率的增加，地表沉降槽凹陷幅度逐步加大和沉降槽曲线反弯点曲率也逐步增大，但沉降曲线的反弯点及地表沉降槽的影响范围几乎没变。

图 10 为地层损失率一定，不同的覆土厚度条件下的地表沉降。可以看出，随着覆土厚度增加，地表沉降逐渐减小；当覆土厚度小于 1 倍洞径时，最大地表沉降达到 34 mm；当覆土厚度大于 2 倍洞径

(32.24 m) 时，最大地表沉降小于 10 mm。同时，随着覆土厚度增加，地表沉降槽凹陷幅度趋于平缓，沉降槽曲线反弯点曲率也逐步减小，但沉降曲线的反弯点及地表沉降槽的影响范围几乎没变。

5 理论计算与数值模拟结果比较

结合工程地质条件，本文通过理论计算对横向地表沉降进行预测， i 选用公式 (4)。选取埋深为设计值（隧道顶部距干渠底部为 32.24 m）时，不同的地层损失率（0.25% 和 1.5%）的理论计算结果与数值模拟结果进行对比；选取地层损失率为 0.5% 时，不同的隧道埋深（距干渠底部 32.24 m 和 10 m）的理论计算结果与数值模拟结果进行对比，如图 11 和 12 所示。

由图 11 可以得到，当地层损失率为 0.25% 时，理论计算得到地表最大沉降量为 5.33 mm，数值模拟得到的地表最大沉降量为 5.57 mm；当地层损失率为 1.5% 时，理论计算得到地表最大沉降量为 31.99 mm，数值模拟得到的地表最大沉降量为 32.39 mm。由图 12 可以得到，当隧道顶部距干渠底部为 32.24 m 时，理论计算得到地表最大沉降量为 10.65 mm，数值模拟得到的地表最大沉降量为 7.58 mm；当隧道顶部距干渠底部为 10 m 时，理论计算得到地表最大沉降量为 34.37 mm，数值模拟得到的地表最大沉降量为

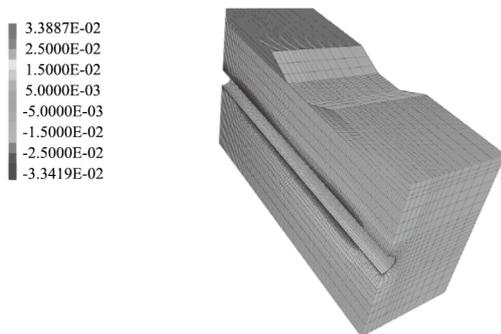


图 5 竖向位移云图
Fig.5 Vertical displacement of the model

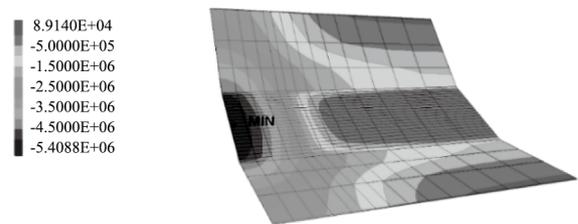


图 7 干渠结构最小主应力云图
Fig.7 Minimum principal stress of the model

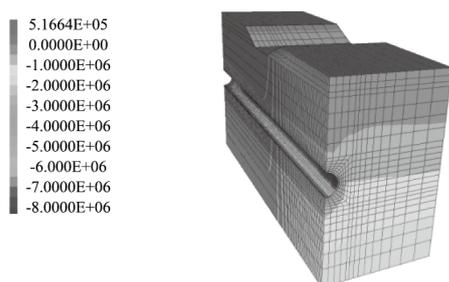


图 6 水平位移云图
Fig.6 Horizontal displacement of the model

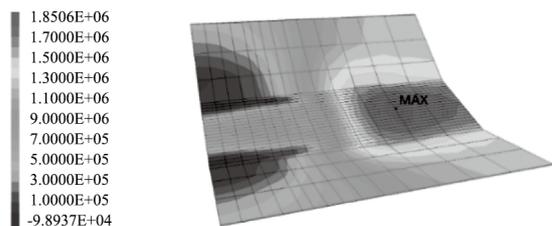


图 8 干渠结构最大主应力云图
Fig.8 Maximum principal stress of the model

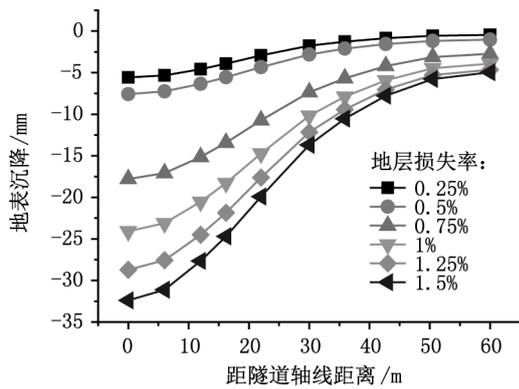


图9 不同地层损失率条件下的地表沉降
Fig.9 Surface displacement under different strata loss rate

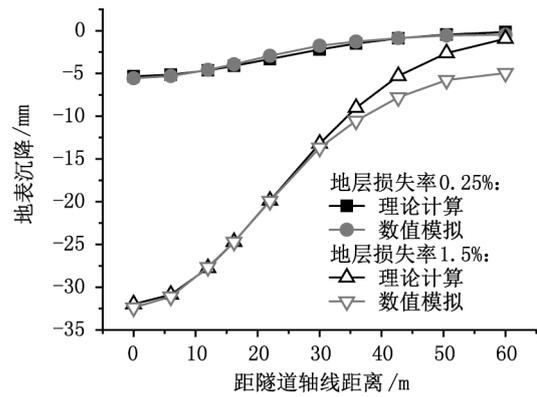


图11 不同地层损失率的地表沉降比较图
Fig.11 Surface displacement under different strata loss rate

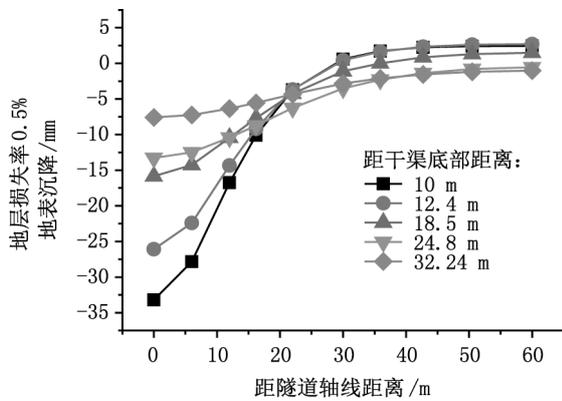


图10 不同覆土厚度条件下的地表沉降
Fig.10 Surface displacement under different covering depth

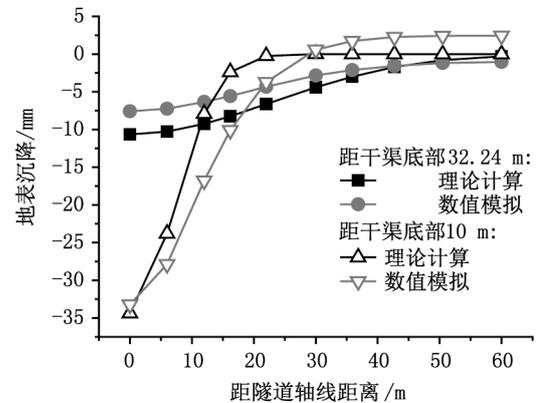


图12 不同埋深的地表沉降比较图
Fig.12 Surface displacement under different covering depth

33.2 mm。FLAC3D 数值模拟结果与 Peck 理论计算结果吻合程度较高且变化趋势保持一致,说明数值模拟结果较为可靠。

6 结论

1) 当干渠底部距开挖面顶部距离为 32.24 m (设计值), 地层损失率为 0.5% 时, 盾构施工造成的地表沉降约为 7 mm, 干渠结构沉降约为 6 mm, 满足干渠结构沉降控制标准。干渠结构最大主应力为 1.8 MPa, 最小主应力为 -5.4 MPa, 干渠结构安全。

2) 当地层损失率控制在 0.5% 以内及覆土厚度大于 2 倍洞径时, 地表沉降小于 10 mm, 满足南水北调干渠沉降控制标准。地层损失率和覆土厚度都对盾构施工影响较大, 随着地层损失率的增大, 地表沉降逐渐增大, 而随着覆土厚度的增大, 地表沉降会逐渐减小。沉降曲线的反弯点及地表沉降槽的影响范围几乎没变。

3) 对比理论计算与数值模拟结果, 发现二者变

化趋势相同, 吻合程度相对较高, 证明了本次数值模拟的可靠性。

参考文献:

- [1] 杨喜, 邹琦, 王庆. 地铁隧道穿越南水北调干渠施工影响分析 [J]. 隧道建设, 2013, 33(7): 562-566.
- [2] 朱永全, 高新强. 穿越南水北调干渠热力隧道设计研究 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自科版, 2010, 23(2): 7-11.
- [3] 谢文斌, 吴为义. 大直径泥水盾构下穿钱塘江大堤引起地层沉降的实测分析 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 142-147.
- [4] 黄平, 李林. 上海大直径盾构隧道施工引起地表沉降研究 [J]. 公路工程, 2016, 41(5): 156-160.
- [5] 张印涛, 陶连金, 边金. 盾构隧道开挖引起地表沉降数值模拟与实测分析 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(4): 332-337.
- [6] PECK R B. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics [J]. Geotechnique,

- 1969, 19(2): 171-187.
- [7] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction[R]. 1982.
- [8] CELESTINO T B, GOMES R, BORTOLUCCI A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2000, 15(1): 97-100.
- [9] 李鹏. 地铁盾构隧道穿跨越施工对既有越江隧道的影响机理及控制指标研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [10] 王建秀, 田普卓, 付慧仙, 等. 基于地层损失的盾构隧道地面沉降控制[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(3): 569-576.
- [11] 张坤勇, 李广山, 李旺林, 等. 南水北调南干渠边坡有限元稳定性分析[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2016, 33(4): 27-32.
- [12] 纪梅, 谢雄耀. 大直径土压平衡盾构掘进引起的地表沉降分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2012(1): 161-166.

(上接第60页)到位,基本已经达到低成本、高效应的目标。使用效率、出行方式和站点间距指标处于“良”和“中”之间,对“良”灰类较接近;消费水平属于“良”灰类;舒适程度、便捷程度和环境效应指标处于“优”和“良”之间,“良”灰类较为接近;说明这四个指标执行也较好。年龄结构指标处于“良”和“中”之间,接近于“中”灰类;意识效应指标处于“中”和“差”之间,接近于“差”灰类;说明这两个指标执行的还有一定缺陷,存在明显的不足。

4 结论

总体上看,邯郸地区的公共自行车服务系统建设属于“良”灰类,该公共自行车服务系统执行效果较好,但不显著;“优”灰类和“中”灰类值均较低,“优”灰类和“良”灰类差别较大,需要更加进一步优化公共自行车服务建设。为解决存在的问题,政府和公交公司需要为该系统做进一步宣传,增强群众的低碳环保意识;时时听取人民意见,将站点间距达到最优,真正做到公共自行车就在身边,更为便捷;定期体验和检测车身状况,保证自行车车身完整舒适,使骑行者满意选择。

通过使用灰色聚类方法分析评价邯郸地区公共自行车服务系统中发现:该服务系统在执行效果方面达到较为显著,以低成本投入获得显著效果,民众对环保措施有了进一步了解,可以为避免空气进

一步严重污染,保护环境尽一分力。且此方法简洁分明、规范易掌握;对聚类对象数据源的限制程度低;系数之间的离散性比较大,辨识度较高;适合分析评价该公共自行车服务系统。

参考文献:

- [1] 张国兴,高秀林,汪应洛,等.政策协同:节能减排政策研究的新视角[J].*系统工程理论与实践*, 2014(3): 545-559.
- [2] 李煜华,胡运权.灰色聚类法在城市公共交通发展水平中的应用[J].*数学的实践与认识*, 2006, 2(36): 125-132.
- [3] 王欢明,李鹏.城市公共自行车服务民营化供给模式比较研究[J].*中国软科学*, 2015(6): 56-66.
- [4] 朱玮,何京洋,王德.法国公共自行车系统布局方法与实证研究——以巴黎和里昂为例[J].*国际城市规划*, 2015(Z1): 64-70.
- [5] 钱佳,汪德根,牛玉.城市居民使用市内公共自行车的满意度影响因素分析——以苏州市为例[J].*地理研究*, 2014(2): 358-371.
- [6] 谷丛,王菲.杭州市公共自行车使用情况调查分析[J].*统计科学与实践*, 2010(12): 8-10.
- [7] 刘思峰,方志耕,杨英杰.两阶段灰色综合测度决策模型与三角白化权函数的改进[J].*控制与决策*, 2014, 29(7): 1232-1238.
- [8] 刘思峰,杨英杰,吴利丰,等.灰色系统理论及应用[M].北京:科学出版社, 2014: 113-139.