

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.06.008

断裂破碎带围岩松动区隧洞开挖 应力变形特性分析

周 恒, 黄旭斌, 狄圣杰, 陆 希, 王冬条

(中国电建集团西北勘测设计有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 隧洞开挖过程中穿越断裂破碎带时, 由于岩体条件差, 在施工方式扰动下普遍会引起围岩出现松动圈, 甚至坍塌。为厘清隧洞开挖过程中围岩松动圈应力及变形变化规律, 以哈密抽水蓄能电站通风兼安全洞为例, 建立三维数值计算模型, 采用有限差分法, 分析了断裂破碎带围岩松动圈隧洞开挖支护过程中围岩径向应力、变形及塑性区变化规律。结果显示顶拱径向应力主要集中在松动圈前端, 且下半层的开挖对其应力影响较小; 隧洞上、下半层开挖对拱顶径向变形规律一致, 均沿开挖深度呈抛物线型分布, 且最大值均位于松动圈前端; 开挖完成后, 不同部位围岩的变形大小关系为拱顶 > 边墙中心 > 拱肩; 围岩塑性区主要分布在边墙和底板周围, 且均为剪切塑性破坏, 因此施工过程中还需加强边墙和底板处的支护措施。研究成果可为断裂带围岩坍塌形成松动圈隧洞支护设计提供参考。

关键词: 隧洞; 断裂破碎带; 松动圈; 径向应力; 径向变形; 塑性区

中图分类号: TV311

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)06-0050-05

Analysis on Stress and Deformation Characteristics of Tunnel Excavation in Loosing Area of Surrounding Rock in Fault Zone

ZHOU Heng, HUANG Xubin, DI Shengjie, LU Xi, WANG Dongtiao

(Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Due to poor conditions of surrounding rock, it will often form loose area or even collapse in the excavation process of tunnel crossing fault zone. In order to explore the stress and deformation variation of surrounding rock with loosening area during tunnel excavation, the ventilation and safety tunnel of Hami Pumped Storage Power Station was taken as an example. And a 3D numerical calculation model was established and finite difference method was adopted to analyze the variation law of radial stress, deformation and plastic zone during the excavation and support process of surrounding rock with loosening area in fault zone. The calculation results indicate that the radial stress of the top arch is mainly concentrated in the front of the loose area, and the excavation of the lower half layers has little influence on the radial stress of the top arch. The radial deformation of the upper and lower half layers of the tunnel is consistent with that of the arch, which is distributed in a parabolic shape along the excavation depth, and the maximum value is located at the front of the loosening circle. After excavation, the relationship of deformation value at different position on the monitored section is vault > center of side wall > arch shoulder. The plastic zone of surrounding rock is mainly distributed around the side wall and the bottom plate, and both of them are shear plastic failure. Therefore, the supporting measures at the side wall and bottom plate should be strengthened in the construction process. This study can provide reasonable suggestions for the support design of loose area tunnel formed by collapse of surrounding rock in fault zone.

Keywords: tunnel; fault zone; loose area; radial stress; radial deformation; plastic zone

收稿日期: 2022-07-11

修稿日期: 2022-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目“寒旱区水工混凝土冻融损伤细观演变过程及本构模型研究”(52079109)

作者简介: 周 恒(1970—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工结构方面研究工作。E-mail: SZ-GBX@163.com

通讯作者: 黄旭斌(1989—), 男, 博士, 主要从事寒区及特殊地质条件下水利及岩土工程研究工作。E-mail: hxbxmt@126.com

护方式采用及时支护的方法。选取桩号 0 + 630 典型断面(松动圈最大高度处)及沿洞轴线方向纵剖

图,分析拱顶中心、拱肩和边墙中心的径向应力、径向变形及塑性区分布。

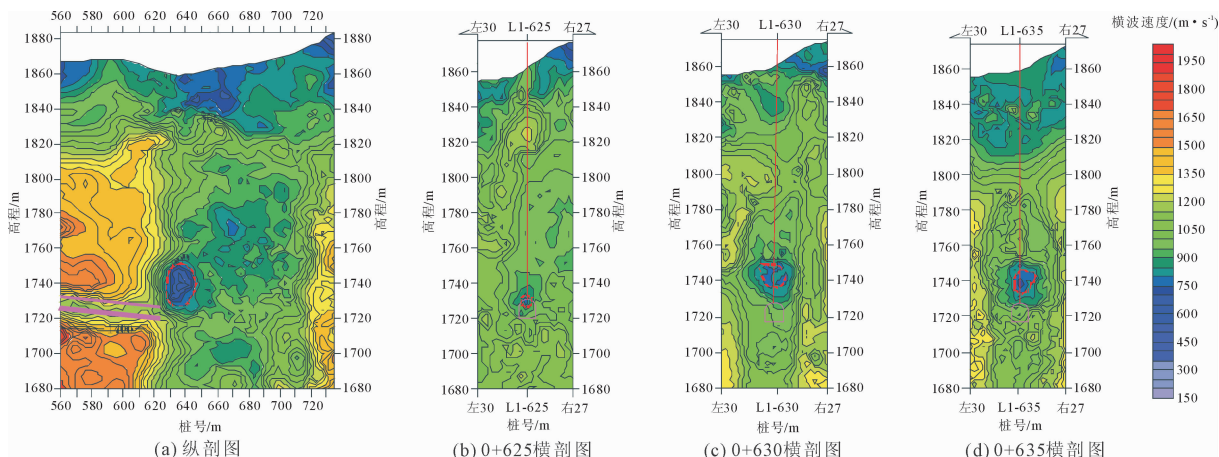


图 2 通风兼安全洞物探检测结果

模型沿洞轴线方向长度为 30 m,计算范围取开挖区域 10 倍高度(宽度)。模型中 x 方向为隧洞洞轴线方向, y 方向为垂直于洞轴线方向, z 方向为垂直方向。模型共划分网格 218 130 个,节点 230 516 个,如图 3 所示。模型边界条件为四个侧面约束法向位移,底部为全约束,顶部按照实际隧洞埋深施加相应面荷载。初始地应力计算中由于断裂带处的构造应力容易释放,因此仅考虑了自重应力的作用。岩体、注浆层及喷层采用实体单元模拟,锚杆采用杆单元模拟,钢拱架采用梁单元模拟。

圈内岩体、加固区以及其他支护的计算参数,如表 1 所示。

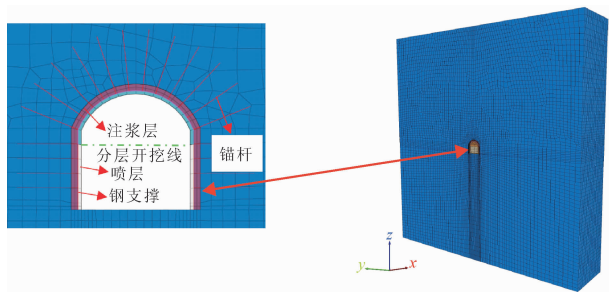


图 3 计算模型示意图

隧洞起始桩号为 0 + 620,围岩松动圈位于桩号 0 + 625—0 + 645,其中桩号 0 + 625—0 + 630 段松动圈下边缘与隧洞注浆层相接壤。松动圈沿洞轴线方向长度为 20 m,最大高度约为 18 m,如图 4 所示。

值得注意的是,在实际工程中,由于围岩的完整性及其潜在的节理裂隙,很难保证注浆区域的范围大小。为了保证隧洞在实际工程开挖稳定,因此在本文计算中将注浆层等效为开挖面外 0.5 m 的加固区处理。根据现场地质勘测,确定了 V 类围岩、松动

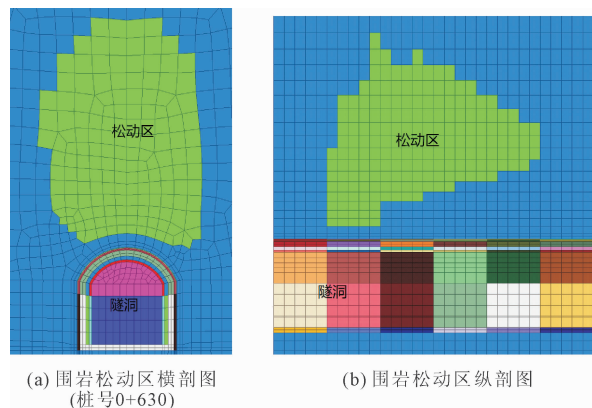


图 4 围岩松动区域示意图

表 1 加固区、围岩及支护措施物理力学参数

岩土体	c /MPa	φ /($^{\circ}$)	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ν	E /GPa
V 类围岩	0.05	30	2000	0.350	1.5
松动圈内岩体	0.01	26	1800	0.160	0.1
小导管/管棚 注浆加固区	0.50	35	2000	0.320	2.0
喷层混凝土	—	—	2450	0.167	26.0
锚杆	—	—	7850	0.300	200.0
钢支撑	—	—	7850	0.300	200.0

3 结果分析

3.1 围岩径向应力分析

图 5 给出了隧洞开挖后拱顶中心的径向应力随隧洞径向深度的变化规律,从图 5 中可以看出,上半

洞开挖支护完成后,非坍塌段隧洞前端3 m内围岩径向应力随开挖深度的增大而减小。当开挖面接近松动圈时,围岩径向应力开始增大,说明松动圈对非松动圈的径向应力变化有一定的影响。松动圈开挖后,松动圈内近7 m的应力波动较大,主要是由于松动圈前端与注浆层顶部接壤,上半洞开挖后松散围岩材料发生的变形较大,因此作用在支护上的应力过大。由于松动圈沿径向深度呈斜面,因此松动圈7 m后围岩径向应力整体上呈下降趋势。从图中还可以看出,下半洞开挖后松动圈内拱顶中心的围岩径向应力变化较小,且发展规律与上半层开挖后的规律一致,说明上半层开挖后松动圈内拱顶中心径向应力释放基本达到稳定,下洞开挖后对松动圈内拱顶中心的径向应力变化贡献较小。

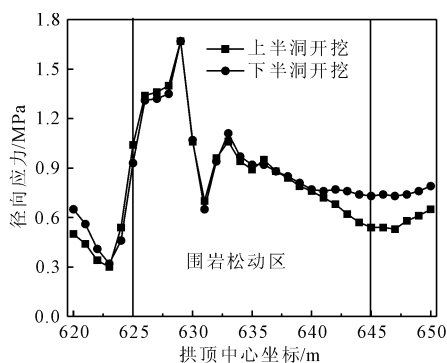


图5 拱顶中心径向应力随开挖深度变形规律

隧洞拱顶中心、拱肩及边墙中心径向应力随开挖步数的变化规律如图6所示。

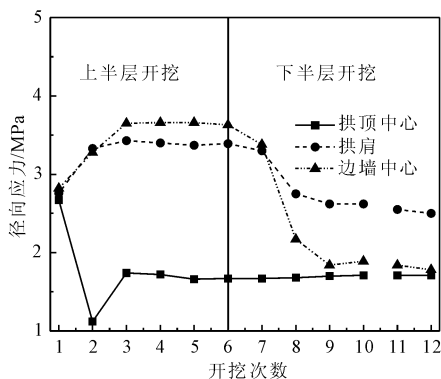


图6 各测点径向应力随开挖次数变化规律

从图6中可以看出,第二步开挖时已开挖至监测断面,拱顶中心的径向应力减小。再者,开挖后由于围岩变形导致的挤密作用,拱肩和边墙中心的应力呈增大的趋势。开挖第二步后,拱顶中心的径向应力随着开挖步数的增加变化幅度较小。开挖至第七步后,拱肩和边墙中心的径向应力减小,且边墙中

心应力的减小幅度大于拱肩应力的减小幅度,说明下半层的开挖对边墙中心的影响最大,其次对拱肩位置有一定的影响,对拱顶基本没有影响。在第九步开挖之后,各测点的径向应力基本都达到稳定。

3.2 围岩径向变形分析

隧洞开挖后拱顶径向变形量随开挖深度的变化规律如图7所示,从图7可以看出,上半层开挖支护完成后,整体上拱顶变形呈抛物线型分布。其中,在非松动圈前端,拱顶中心径向变形随着开挖深度的增加而增大,换言之,接近松动圈的围岩受到松动圈软弱围岩的影响,其径向变形也相应的增大。在松动圈内,由于前5 m与注浆层接壤,相应的最大径向变形量达到最大值。最大径向变形量位置在桩号0+627,随后随着径向深度的增大,径向变形量呈减小的趋势。下半层开挖支护完成后的径向变形随径向深度的变化规律与上半层开挖支护完成后的规律基本一致,但拱顶的径向变形量有所增大,说明下半层的开挖对拱顶的径向变形有一定的影响。非松动圈增幅约为24%,松动圈最大径向变形量的位置由0+627转变为桩号为0+628,此位置的增大幅度约为8%。

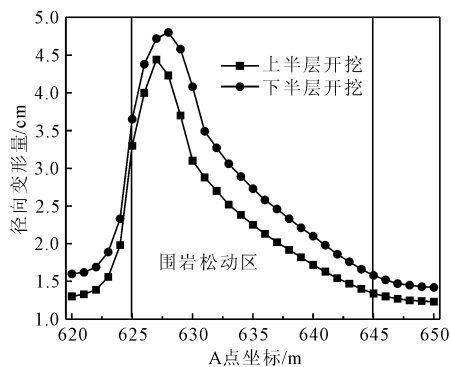


图7 拱顶中心径向变形量随开挖深度变化规律

隧洞拱顶中心、拱肩及边墙中心径向变形量随开挖步数的变化规律如图8。从图8可以看出,对于拱顶中心而言,前三步的开挖对其径向变形的影响最大,上半层后续的开挖对其径向变形影响稳步增大,至上半层开挖完成后,拱顶中心的变形达到3 cm左右。上半层的开挖对拱肩和边墙中心的变形有一定的影响,主要是由于上半层开挖后,上半层临空面的应力得到释放,隧洞上半部分的围岩径向变形向着临空面。拱肩位置受到弧形拱顶和边墙两方面的影响下有一定的稳定性,因此上半层开挖后的径向变形较小,约为1 cm。下半层开挖后,拱顶中心和拱肩的径向变形均开始增大,说明下半层的开

挖对已支护完成的上半层的径向变形有一定的影响。在整个下半层开挖过程中,边墙中心的径向变形幅度最大,拱顶中心和拱肩径向变形幅度相当,略小于边墙。

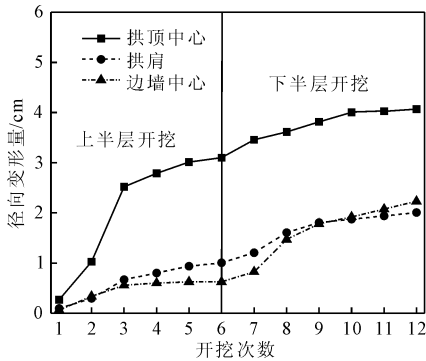


图 8 测点变形量随开挖次数变化规律

整体而言,隧洞完全开挖后,监测断面上各点的径向变形大小关系为拱顶 > 边墙中心 > 拱肩。进一步,根据文献[15]中围岩稳定性的评判标准,结合文中隧洞尺寸及围岩条件,确定出了隧洞围岩稳定的控制标准,允许位移为 5.1 cm ~ 13.6 cm。根据计算结果可知,隧洞拱顶中心、拱肩及边墙中心的位移最大值分别为 4.1 cm、2.1 cm 和 1.9 cm,均未超过允许范围,因此可以判断在本文提供的支护条件下隧洞开挖后可以稳定。

3.3 围岩塑性区分析

图 9(a) 给出了隧洞上半层开挖后围岩塑性区,从图中可以看出,上半层开挖后隧洞周边围岩出现了部分塑性破坏,且破坏主要发生在边墙部位及未开挖区域,均为剪切破坏,此外,相比较可以看出,由于上半层开挖支护完成后,在一衬支护的作用下,拱顶周围现有塑性区较小。图 9(b) 为隧洞下半层开挖后围岩塑性区分布,从图中可以看出,在下半层开挖支护完成后,弧形拱顶上部基本无现有塑性区,塑性区主要分布在边墙周围以及底板位置。其中,边墙侧的塑性区范围约为隧洞开挖宽度的 1/2,与锚杆长度相近,在施工中可采取加长锚杆的措施以防边墙锚杆失效;底板下部的塑性区约为开挖高度的 1/3,底板塑性变形过大可能会导致底板向上隆起,因此需采取相应措施。

4 结 论

本文以哈密抽水蓄能电站通风兼安全洞为例,采用数值模拟分析了断裂破碎带围岩松动圈隧洞开挖支护过程中围岩径向应力、变形及塑性区变化规律,得到了如下结论:

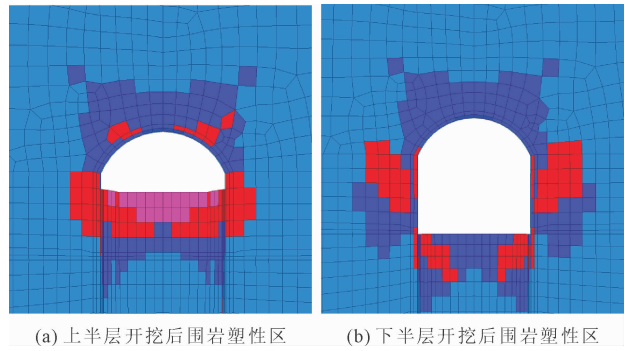


图 9 隧洞开挖后围岩塑性区云图

(1) 隧洞开挖后,径向应力主要集中于围岩松动圈前端,且隧洞下半层开挖后对拱顶围岩压应力影响较小,说明本文中提到的支护方式可以保证隧洞拱顶的稳定性。

(2) 沿洞轴线方向拱顶径向变形呈先增大后减小的趋势;隧洞下半层开挖后,隧洞拱顶中心的变形最大,其次为边墙和拱肩位置,根据相关规范规定,本文中的支护条件下隧洞整体上可以达到稳定。

(3) 隧洞开挖后,拱顶以上没有塑性破坏产生,围岩塑性区主要集中在侧墙和底板位置,因此仍需加强侧墙和底板的支护。

参考文献:

- [1] 付大喜,王小伟,翁效林. 基于 Hoek-Brown 准则的隧道围岩塑性变形研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(3): 76-83.
- [2] 王睿,党发宁,王靖媛,等. 基于松动圈理论的隧道初期支护时机分析[J]. 人民长江, 2021, 52(7): 141-147.
- [3] 徐长节,梁禄钜,陈其志,等. 考虑松动圈内应力分布形式的松动土压力研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1927-1934.
- [4] 魏福贵,朱牧原,李鳌,等. 考虑松动圈的深大竖井稳定性及受荷特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 662-669, 702.
- [5] Mezger F, Anagnostou G, Ziegler H J. The excavation-induced convergences in the Sedrun section of the Gotthard Base Tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 447-463.
- [6] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [7] 郑颖人,朱合华,等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [8] 徐干成,白洪才,郑颖人,等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

有效提高其抗剪强度。不同制备方法对 CMC 改良土有很大的影响,湿法拌合处理的改良土样,CMC 实际用量更少,强度提升有限;干法拌合处理的改良土样,强度能获得更高的提升。

(2) 随着 CMC 掺入量的增加,改良土抗剪强度得到一定的提高,在低法向应力下强度提升更为显著,黏聚力最大可提高到 2.31 倍,而内摩擦角出现小幅降低。

(3) 含水率是影响 CMC 改良效果的重要因素。在相同的含水率下随着 CMC 掺入量的增加,改良土的强度有一定的提高;随着含水率的增加,改良土的抗剪强度有所下降,可能是由于 CMC 用量过大时土中水分不足以使其完全反应。当 CMC 掺入量为 2.0%、设计含水率为 15% 时,对土体强度的提高幅度最大,是最优的改良土处理方案。此外,CMC 与土中水分的结合速度很快,养护时间的长短基本无影响。

参考文献:

- [1] 曹智国,章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3446-3454.
- [2] 林 彤,刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(6):1049-1052.
- [3] 阮 波,彭学先,邓林飞. 水泥土抗剪强度参数试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(4):662-668.
- [4] 陈义群,董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境,2008,17(3):1282-1289.
- [5] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(2):117-123.
- [6] 裴向军,杨晴雯,许 强,等. 改性钠羧甲基纤维素胶

结固化土质边坡机制与抗冲蚀特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(11):2316-2327.

- [7] 马 奇,马宏旺,杨 朔,等. 羧甲基纤维素钠改性生土力学性能研究[J]. 新型建筑材料,2016,43(12):60-62,83.
- [8] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固粉砂土水稳性及稳定机理分析[J]. 长江科学院院报,2019,36(12):107-112,120.
- [9] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固土冻融性能及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):3102-3113.
- [10] 杨 钊,王晓梅,周云艳. 改性植被混凝土基材力学与植生试验研究[J]. 安全与环境工程,2022,29(1):225-233.
- [11] Owji R, Habibagahi G, Nikooee E, et al. Wind erosion control using carboxymethyl cellulose: From sand bombardment performance to microfabric analysis[J]. Aeolian Research, 2021,50:1-13.
- [12] 哈丽代姆·居麦,宁松瑞,王全九,等. 施加 PAM 与 CMC 对土壤水分入渗与蒸发特征的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(1):121-127,134.
- [13] 喜银巧,赵 英,李生字. 三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报,2018,55(6):1401-1410.
- [14] 杨世琦,邢 磊,刘宏元,等. 羧甲基纤维素钠对黄土高原新造耕地土壤改良效果[J]. 中国农业大学学报,2021,26(4):185-191.
- [15] 单鱼洋,马晨光,王全九,等. 羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响[J]. 土壤学报,2021:1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210511.1334.002.html>.
- [16] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

(上接第 54 页)

- [9] 郑颖人,邱陈瑜. 普氏压力拱理论的局限性[J]. 现代隧道技术,2016,53(2):1-8.
- [10] Abdollahi M S, Najafi M, Bafghi A Y, et al. A 3D numerical model to determine suitable reinforcement strategies for passing TBM through a fault zone, a case study: Safaroud water transmission tunnel, Iran[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,88:186-199.
- [11] 党亚山. 复杂断裂带引水隧洞围岩稳定分析及处理措施[J]. 西北水电,2022(1):64-68.
- [12] 邓通海,邓 辉,张 咪,等. 引水隧洞穿越大型断裂

带围岩力学响应[J]. 水电能源科学,2017,35(3):108-112.

- [13] 王 达,石文广,王志云,等. 穿越不良地质段的长距离深埋输水隧洞纵向变形数值分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43:95-101.
- [14] 王淑娟. 跨断层深海隧道衬砌变形规律及加固措施研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):67-75.
- [15] 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015:55-65.