

无水砂卵石地层土压盾构施工泡沫技术研究

宋克志^{1,2}, 汪波³, 孔恒³, 袁大军², 王梦恕²

(1. 鲁东大学 交通学院, 山东 烟台 264025; 2. 北京交通大学 隧道及地下工程实验研究中心, 北京 100044;

3. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100045)

摘要:使开挖土体处于良好的塑流状态,是保证土压平衡盾构顺利掘进的重要措施。无水砂卵石是一种典型的力学不稳定地层,盾构在此条件下掘进,土体塑流性差,刀盘及螺旋输送机磨损严重,开挖面土压平衡不易保持,容易崩塌。以北京市凉水河南岸污水盾构隧道为背景,在加泥的基础上,针对砂卵石地层对泡沫技术进行了室内试验研究和现场应用,与单独加泥的效果进行了比较,并分析了泡沫的作用机理。使用泡沫后,不仅有利于保持开挖面土压平衡,而且机械负荷及刀盘磨损大大减轻,对于保证盾构顺畅地切削排土及匀速推进具有非常重要的意义。

关键词:隧道工程;无水砂卵石;土压平衡盾构;泡沫;泥浆;土体塑流性

中图分类号: U 455.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)13-2327-06

STUDY ON FOAM TECHNOLOGY DURING SHIELD EXCAVATION IN SANDY COBBLE BED WITHOUT WATER

SONG Ke-zhi^{1,2}, WANG Bo³, KONG Heng³, YUAN Da-jun², WANG Meng-shu²

(1. College of Communications, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. Research Center of Tunneling and Underground Works, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Beijing Municipal Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: The main types of shield machine used recently in tunnel construction are earth pressure balance (EPB) shield and slurry shield. In order to keep muck discharged fluently and lighten machine burden, the soils in chamber of EPB shield should be plastic and fluid. This is fundamentally critical to ensure the shield to advance continuously and smoothly. Sandy cobble without water is a typically unstable stratum and its mechanical properties are unfavorable to force's transitivity and spread. Sandy cobble is of unfavorable plasticity and fluidity, which is sure to bring serious wear of cutter wheel and screw. Moreover, earth pressure balance of face is not easily maintained and the face is easy to collapse. As a case of EPB shield construction, a sewage tunnel in Beijing is presented. In the beginning 200 m of the shield tunnel, field driving tests are carried out. Firstly mud is injected into the chamber to sustain the plasticity and fluidity, but perfect effects are not acquired. Then foam technology is studied experimentally and used in field shield construction, in which calculation method and dosage of the foam are recommended. Then test results between injection of mud individual and combined injection of mud and foam are compared; and oil pressure of the cutter wheel and the screw of the later is about 1/3 of the former; surface settlements also decrease from 20 mm to 5 mm. Finally, the mechanism of foam effects is analyzed and its effects can be summed up to two aspects as following: (1) forming a admixture level in the tunnel face composed of sandy

收稿日期: 2004-03-08; **修回日期:** 2004-06-14

作者简介: 宋克志(1970-),男,硕士,1994年毕业于武汉水利电力大学施工机械专业,现为北京交通大学博士研究生、副教授,主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: ytytskz@126.com。

cobbles , mud and foam ; (2) forming a thin membrane around every granules. Study and practice prove that the mud and foam are not only beneficial to earth pressure balance ,but also can lighten mechanical load and abrasion , which are remarkably significant to smooth cutting , soil discharge and high-speed advance of the EPB shield.

Key words : tunneling engineering ; sandy cobble without water ; earth pressure balance shield ; foam ; mud ; plasticity and fluidity of soil

1 引言

盾构法是使用盾构机在地下掘进，边防止开挖面土砂崩塌边在机内安全地进行开挖和施作衬砌从而构筑隧道的一种施工方法。因此，盾构法是由稳定开挖面、盾构机挖掘和衬砌三大要素组成。目前，在众多盾构机类型中，泥水平衡盾构和土压平衡盾构是各类隧道施工的主流机型^[1]。土压式盾构中又有向开挖面注泥的加泥式土压平衡盾构。土压平衡盾构是在切削刀盘及螺旋输送机内部充填的土砂所产生的压力与开挖面的土压保持平衡。施工中主要控制推进千斤顶推力、推进速度、刀盘扭矩和转速、螺旋输送机扭矩和转速以及闸门的开口度等技术参数，使之与开挖面的土压保持动态平衡。有软稠度的粘质粉土和粉砂是最适合使用土压平衡式盾构机的土层，根据土层的稠度，有时不需要水或只需要加少量的水，通过搅拌装置在开挖室内的搅拌，即使十分粘着的土层也能变成塑性的泥浆。砂质土也可用土压平衡盾构，但需要向开挖面注入添加剂。盾构掘进时，影响盾构开挖面平衡压力的建立、盾构姿态控制以及地层变形的主要因素是地层土体条件和地下水含量^[2]。纵观国内外的盾构施工，在一般的粘性土和砂性土地层掘进已有较多成功实例^[2]；文[3, 4]介绍了日本在含水砂砾层用泥水平衡盾构开挖隧道的实例；文[5]研究了砾石层盾构切削刀头的新动向；文[6]介绍了土压平衡盾构在卵砾石地层施工的情况。但在全断面无水砂卵石地层中采用土压平衡盾构开挖隧道，国内外尚不多见，本文即以北京市凉水河南岸污水盾构隧道施工为背景^[7, 8]，对无水砂卵石地层盾构施工泡沫试验及应用技术进行了研究。

2 工程特点及难点

本工程隧道沿线地层断面如图 1 所示。覆土厚度为 5.7 ~ 8.1 m，地下水埋深位于 17.20 ~ 17.90 m。

盾构隧道断面内无地下水，微湿。盾构主要在新近沉积的全断面及部分断面砂卵石、圆砾石层中推进，所穿越的砂卵石地层一般级配良好，粒径为 80 ~ 150 mm，最大粒径 250 mm，含砂率为 20% ~ 25%，内摩擦角为 35°左右，粘聚力接近于 0，盾构穿越砂卵石的照片见图 2。另外，隧道曲线段多，转弯半径小，沿线有大面积的居民区、办公商业区以及京九铁路等重要铁路干线，给工程增加了较大的难度。

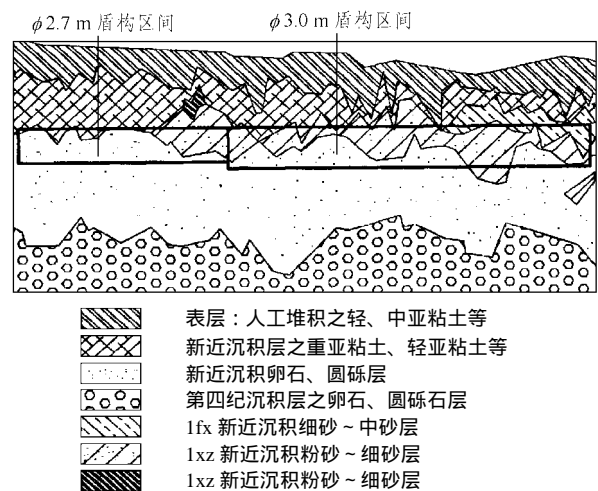


图 1 隧道沿线地层断面图

Fig.1 Longitudinal section of the tunnel



图 2 盾构穿越砂卵石的照片

Fig.2 Sandy cobble picture

砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层，颗粒之间的孔隙大，几乎没有粘聚力，砂卵石地层在无水状态下，颗粒之间点对点传力，地层反应灵敏，

盾构周围地层成拱性差。刀盘旋转切削时,地层很容易破坏原来的相对稳定或平衡状态而产生坍塌,引起较大的围岩扰动,使开挖面和洞壁失去稳定,控制不好会导致地表塌陷。盾构在这种地层中掘进所受到的不利影响主要表现在以下几个方面:

(1) 无水砂卵石颗粒之间摩擦阻力大,难以获得良好的流动性,当切削下来的土充满土室和螺旋输送机内时,会使刀盘扭矩、螺旋输送机转矩及千斤顶推力增大,甚至使开挖排土无法进行。因此,盾构刀盘切削土体时容易使刀盘过热,加剧刀盘刀具的磨损,影响盾构的机械性能。另外,刀盘切削下来的较硬的砂卵石进入螺旋输送机,也会使其工作油压升高而发热,影响其性能,严重时甚至停转。

(2) 无水砂卵石地层的塑流性差,会导致大颗粒卵石滞留土仓内或向盾构机四周移动,使得盾构机位置和姿态控制变得困难,严重时则无法推进。

(3) 由于砂卵石地层的塑流性差,设定的工作压力不能顺利地传递到开挖面,不易实现连续的动态平衡,使开挖面稳定难以保持,导致地表隆沉幅度增大,而且顶部大块卵石剥落还会引起地面的突沉。

从盾构选型的角度讲,这种地层应该选用泥水加压平衡盾构,但由于多种因素的影响,最终选用了加泥式土压平衡盾构,向盾构土仓内注入泥浆,以改良开挖面土体,扩展土压平衡盾构的应用范围。

3 泡沫技术研究及工程应用

为了使开挖土体具有良好的流动性,必须有 30%左右的微细颗粒,砂卵石地层中微细颗粒不足,因此需注入大量泥浆。但施工中发现加泥量过大,土仓内较大的卵砾石会在重力作用下沉至土仓底部,土体不能均匀混合,产生“离析”现象,容易造成刀盘“抱死”现象。因此,为改善泥浆的作用机制,对泡沫技术进行了试验研究,并进行了现场应用。

(1) 泡沫液粘度

泡沫的粘度(强度)与泡沫液的粘度、发泡倍率以及合成泡沫方法有关。

室内试验中依据泡沫与土体拌和后的粘聚性、塌落度及透水性,判断所需泡沫液粘度。在无水砂卵石地层条件下,泡沫液的粘度应不低于 0.15 Pa·s。

(2) 发泡倍率

发泡倍率 k_a (一个标准大气压 P_a 下)指泡沫中气体体积和液体体积之比。在某一压力 P 下的泡沫的发泡倍率 k_p 为

$$k_p = P_a(k_a - 1) / P + 1 \quad (1)$$

泡沫中气体体积同泡沫体积之比称为泡沫的含气量 α , 有

$$\alpha = 1 - 1/k_p \quad (2)$$

泡沫的密度 ρ_f 和起泡沫的密度 ρ_l 以及空气的密度 ρ_g 之间的关系如下:

$$\rho_f = (1 - \alpha)\rho_l + \alpha\rho_g \quad (3)$$

由于气体密度 ρ_g 极低,可忽略不计,故

$$\rho_f \approx (1 - \alpha)\rho_l$$

一般起泡沫的密度 $\rho_l = 1.0 \text{ g/cm}^3$, 故有

$$\rho_f \approx 1 - \alpha$$

则发泡倍率 k_p 为

$$k_p = \frac{1}{\rho_f} \quad (4)$$

工程中所用泡沫其含气量大于等于 90%, 即发泡倍率不低于 10。

(3) 起泡剂

起泡剂用于产生泡沫,本工程研制开发的起泡剂属阴离子表面活性剂,由烷基磺酸盐发泡剂和羧甲基纤维素增粘剂以及其他助剂复配形成,在现场可用聚合物调整泡沫液的粘度。该发泡剂无毒、无刺激,对环境没有污染。

(4) 合成试验

泡沫可由搅拌法和撞击法形成,搅拌时间长短对泡沫质量影响较大,因而不适用于隧道施工。用撞击法形成泡沫时,合成器内压力对泡沫影响较大。在一定压力范围内,合成器内压力越大,泡沫质量越好,但发泡倍率会降低。

(5) 泡沫配制计算

根据土层颗粒级配,通过室内试验确定泡沫添加率为 35%时(即切削 1 m^3 渣土需注入泡沫 350 L),在 60 r/min 的低转速下,泡沫与土体(重 15 kg)在 3 min 内可完全拌和均匀。并且随着均匀程度的增加,搅拌机的功率也逐渐降低,前后可降低 35%。

按照发泡倍率取 10,土仓内土压力取 0.06 MPa,可以求得所需的起泡沫的体积为: $\frac{1}{10} \times 350 = 35 \text{ L}$;

空气的体积为: $\frac{9}{10} \times \frac{0.1 + 0.06}{0.1} \times 350 = 504 \text{ L}$ 。

按起泡沫剂、水的比例分别为 3%和 97%,配制

35 L 的起泡液需起泡剂的体积为： $0.03 \times 35 = 1.05 \text{ L}$ ；需要水的体积为： $0.97 \times 35 = 33.95 \text{ L}$ 。

(6) 发泡设备工作原理

发泡设备主要由空压机、水泵、起泡剂溶解搅拌桶、合成器以及必要的计量附件组成。将泡沫材料在地面进行混合，经由管路输送至盾构台车，由盾构台车上的泡沫发生装置将泡沫材料吹制成泡沫，通过管路在刀盘处与泥浆进行混合，然后进入土仓中^[9]。

4 施工效果

为验证泡沫的使用效果，在无水砂卵石地层盾构推进的前 200 m，对单独加泥和混合使用泥浆、泡沫进行了对比试验，单独加泥与泥浆泡沫混合使用参数见表 1^[8]。泡沫生产及添加系统如图 3 所示。

表 1 单独加泥浆与泥浆泡沫混合使用参数

Table 1 Parameters of mud individual and combined mud and foam

方式	加泥量/(L·环 ⁻¹)	加泡沫量/(L·环 ⁻¹)
单独加泥浆	3 500	0
泥浆泡沫混合使用	900 ~ 1 500	2 400 ~ 2 600

加入泡沫有助于改善土压平衡盾构在砂卵石地层中的掘进性能，前后盾构掘进参数比较见图 4。由比较结果可知，改用泥浆泡沫混合使用后，盾构刀盘油压和螺旋输送机油压及总推力都降低了 1/3 左右，现场观察发现，刀盘磨损大大减轻，刀盘“抱死”发生频率极少。说明盾构在无水砂卵石地层掘进时，在加泥的基础上注入泡沫能显著降低刀盘油压及盾构推力，减小刀盘扭矩，减轻砂卵石地层对盾构设备的磨损，提高了设备的使用受命。由于减

少了换刀和维修的次数，掘进速度也大大提高，根据施工资料的统计，单独加泥情况下平均每天掘进 8 ~ 12 环，泥浆、泡沫混合使用情况下则提高到每天掘进 15 ~ 18 环。图 5 为开挖面土压力比较。由图 5 可见，单独加泥时开挖面土压力波动较大。这是由于卵石粒径较大，泥浆难以在全断面上形成良好的塑流体，设定的工作压力也不能顺利地传递到开挖面，实现不了连续动态平衡，而加泡沫可以改善这一状况，土压平衡保持得相对较好，开挖面的稳定得到有效的控制，减小了地表隆沉幅度，据现场监测，使用泡沫前地表沉降量一般大于 10 mm，而添加泡沫后大部分监测点的沉降量为 5 ~ 10 mm。

5 泡沫的作用原理

加泥式土压平衡盾构注入泡沫实际是为了进一步改善开挖面土体的物理和力学性质，增加其塑性流动性和止水性，防止切削土砂粘附在刀盘及螺旋输送机内，避免闭塞现象，减轻机械负荷，降低刀盘扭矩和推力^[9]。泥浆和泡沫的作用机理主要表现在以下几个方面：

- (1) 通过注入泥浆和泡沫，在刀盘前方形成了一层泥膜，建立起泥土压力，为土体结构提供水平推力，有利于形成拱结构。
- (2) 泥浆和泡沫使开挖面土体的强度和刚度得到加强，提高了开挖面土体的竖向抗力，对开挖面土体起到了支护作用，减少了开挖面上方土体失稳的可能。
- (3) 砂卵石地层颗粒松散，无粘聚力，颗粒之间的传力方式为点对点，向开挖面土体添加泥浆后，泥浆包围在颗粒周围，形成了一层泥膜，增加了颗粒之间的粘聚力，使得颗粒之间的传力得到扩散，改善了土体的受力状况，如图 6 所示。另外，泡沫

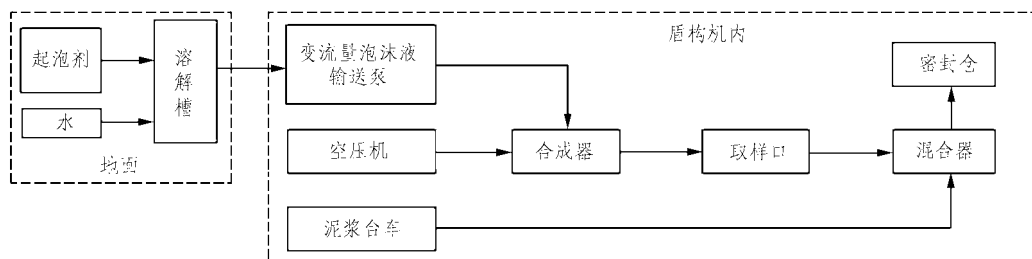
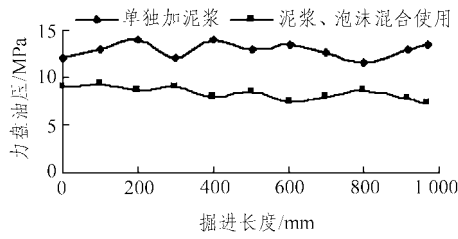
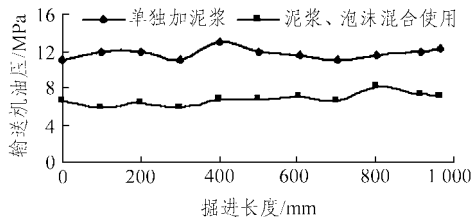


图 3 泡沫生产及添加系统图

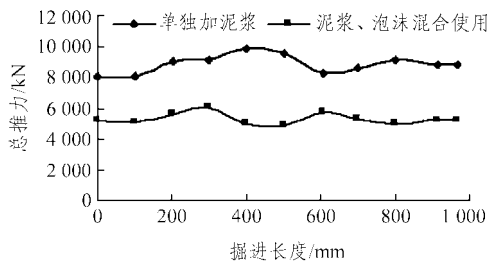
Fig.3 System of foam production and injection



(a) 刀盘油压



(b) 螺旋输送机油压



(c) 总推力

图 4 盾构掘进参数比较

Fig.4 Comparison of shield driven parameters

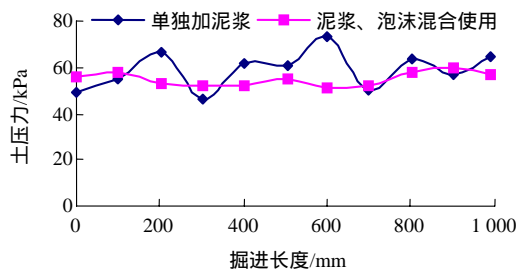


图 5 开挖面土压力比较

Fig.5 Comparison of the face earth pressures

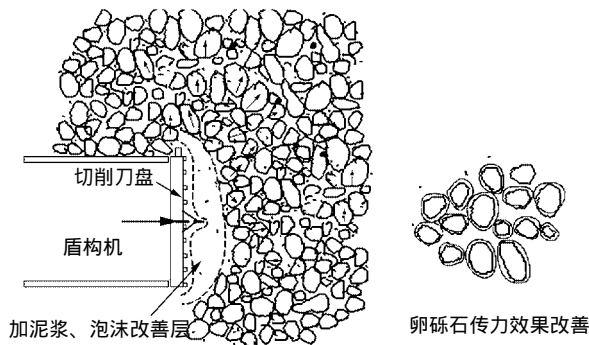


图 6 加泥浆、泡沫对开挖面土体的改善

Fig.6 Contribution of foam and mud to face soils

的体积极小，混合后泡沫的泥浆扩散性得到增强，可以在刀盘的搅拌下迅速渗透到土层中，将砂卵石颗粒包裹起来，降低了土体的密实度，改善了土体的塑流性。

(4) 利用泡沫优良的润滑性能，改善土体粒状构造，同时吸附在颗粒之间的气泡可以减少土体颗粒与刀盘系统的直接摩擦。降低土体的渗透性，又因其比重小，搅拌负荷轻，容易将土体搅拌均匀，从而做到既能平衡开挖面土压，又能连续向外顺畅排土。同时泡沫具有可压缩性或称之为弹性，对土压的稳定也有积极作用。

6 结 语

土压平衡盾构原本是为低塑性的粘性土层开发的，后采用加泥技术改善了土体的塑流性而将其用于砂性土中开挖隧道。而无水砂卵石地层颗粒间孔隙和摩擦都比较大，仅注入泥浆效果不良。因此对泡沫技术进行了室内试验，并进行了自主开发并用于工程实践。经比较表明，通过注入泡沫极大地改善了开挖面土体的塑流性，有效地降低了盾构的扭矩和推力，减轻了机械负荷和磨损，减少了换刀次数，提高了工效。良好的塑流性使土体受力状况得到了改善，易使开挖面土压保持动态平衡，减小了地层隆沉幅度，确保了盾构安全、顺利地推进。另外，泡沫技术的使用也进一步拓宽了土压平衡盾构的使用范围，为无水砂卵石地层盾构施工提供了成功范例。

参考文献(References)：

- [1] 日本土木工程学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱 伟译. 北京：中国建筑工业出版社，2001.(Japanese Society Civil Engineering. Standard Code for Tunnel(Shield Tunnelling)[M]. Translated by Zhu Wei. Beijing :China Architecture and Building Press , 2001.(in Chinese))
- [2] 尹旅超，朱振宏，李玉珍，等. 日本隧道盾构新技术[M]. 武汉：华中科技大学出版社，1999.(Yin Luchao ,Zhu Zhenhong ,Li Yuzhen , et al. Recent Technologies on Japanese Shield Tunnel[M]. Wuhan : Huazhong University of Science and Technology Press , 1999.(in Chinese))
- [3] 吉田保. 用泥浆盾构法开挖含水砂砾层[J]. 隧道译丛，1989，9：50-59.(Yoshida. Construction using slurry shield in water sandy cobble level[J]. Journal of Tunnel Translations , 1989，9：50-59.(in

- Chinese))
- [4] 小林寿利. 泥水加压盾构在卵石砂砾地层中的掘进[J]. 隧道与地下, 1992, 23(3): 45-58.(Kobayashi. Tunnel driving in gravel level with slurry pressure shield[J]. Tunnels and Underground, 1992, 23(3): 45-58.(in Chinese))
- [5] 竹山乔. 砾层盾构切削刀头的研究动向[J]. 隧道与地下, 1992, 23(2): 43-48.(Takeyama. Currents on shield cutting head in gravel bed[J]. Tunnels and Underground, 1992, 23(2): 43-58.(in Chinese))
- [6] 林要一. 砂砾卵石地层土压盾构及新奥法施工[J]. 隧道与地下, 1990, 21(8): 15-22.(Hayashi. Construction with earth pressure shield and NATM in cobble level[J]. Tunnels and Underground, 1990, 21(8): 15-22.(in Chinese))
- [7] 乐贵平,赵宏伟,周秀普,等. 穿越全断面砾石层的盾构施工[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(5): 9-12.(Le Guiping, Zhao Hongwei, Zhou Xiupu, et al. Construction of EPB shield passing through gravel level[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(5): 9-12.(in Chinese))
- [8] 周秀普. 盾构法施工技术在无水砂卵石地层中的应用[J]. 市政技术, 2003, 21(4): 195-203.(Zhou Xiupu. Application of shield method to without water sandy cobble bed[J]. Municipal Engineering Technology, 2003, 21(4): 195-203.(in Chinese))
- [9] Bernhard M, Martin H, Lothar A. Mechanized Shield Tunneling[M]. [s. l.]: [s. n.], 1996.

新书简介

《生态工程学导论》一书由杨京平编著, 化学工业出版社 2005 年 5 月出版, 定价 42.00 元。

该书是一本较全面、系统阐述生态工程及相关技术的著作, 详细介绍了生态工程学原理、发展的历史与主导原理、生态工程的设计理论与方法、关于农业、工业、环境、景观、湿地、城市及园林建设中生态工程的理论应用和相应的技术配套体系以及目前高新技术在生态工程学领域中的应用。同时, 还列举了大量生动的典型实例和相关技术措施。

该书可作为大专院校相关专业师生, 生态、环保和农林科技工作者、技术人员和管理干部的参考书。

《信息生态学》一书由卢剑波编著, 化学工业出版社 2005 年 6 月出版, 定价 30.00 元。

该书回顾了信息生态学的发展, 介绍了各种信息理论, 阐述了信息的采集方法和处理技术, 系统讨论了生态信息系统和生态系统模拟模型的建立方法, 列举了不同种类、种群生态系统的模拟模型; 该书还通过大量实例, 详细介绍了计算机在信息生态学、信息理论的发展及提出过程中所起的作用, 并阐述了计算机在各种模拟模型过程中的作用。

该书可作为大专院校相关专业师生和相关领域研究人员的参考书。

《地理信息系统在自然保护区规划与管理中的应用》一书由欧阳志云, 肖 琰等编著, 化学工业出版社 2005 年 5 月出版, 定价 36.00 元。

该书主要介绍了地理信息系统的基础知识及其在各种尺度的自然保护区规划与管理中的应用, 具有较强的应用性和借鉴意义。

该书可作为环境科学、生态规划、自然保护区规划与管理领域科研人员、管理人员以及高等院校相关专业师生的参考书。