

上海市深基坑工程地面沉降评估理论与方法

龚士良^{1,2}, 叶为民³, 陈洪胜¹, 陈宝³, 杨天亮¹, 万敏³

(1. 上海市地质调查研究院, 上海 200072; 2. 中国地质调查局地面沉降研究中心, 上海 200072;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:深基坑工程是高层建筑、地铁隧道、地下空间开发利用等城市建设中的重要基础工程。随着土地节约集约化利用不断加强, 基坑的深度与规模日渐提高。深基坑工程对区域地面沉降有明显影响。但针对性的地面沉降危险性评估尚属空白。根据深基坑工程地面沉降效应的理论分析与案例剖析, 不同的设计施工方案对地面沉降有直接影响。含水层的疏干或降压是主要因素。地面沉降主要集中在开挖深度 2 倍的平面范围内, 最远可达 10~15 倍开挖深度。地面沉降基本呈指数型衰减。现行的技术规程将 2 倍开挖深度范围作为基坑工程沉降监测与控制的重点。因此深基坑工程对区域地面沉降的影响评估应着重于 15 倍的开挖深度区间范围。提出了深基坑工程地面沉降评估的技术准则与主要技术环节的工作要点。

关键词:深基坑工程; 地面沉降; 危险性评估; 技术方法; 上海市

文章编号:1003-8035(2008)04-0055-06

中图分类号:P642.2

文献标识码:A

1 引言

随着实践积累和理论进步, 深基坑工程的设计施工日益成熟和规范^[1~4]。但环境影响仍不可避免, 特别是施工过程中的地面变形是导致周围环境变化的主要原因, 并危及基坑自身安全。这在深大基坑中尤为关键。深基坑工程不仅引发或加剧地面沉降, 还会诱发流砂与突涌, 导致基坑边坡失稳塌方、支护结构破坏、地面塌陷等安全事故。因此, 地质灾害防治是深基坑工程设计施工的重要内容。上海是典型的软土地基地区。深基坑工程的地面沉降表现明显。上海的深基坑工程面广量多^[5,6], 迄今高层建筑基坑的最大平面尺寸达 274m × 187m, 面积超过 51000m², 最大开挖深度近 40m; 地铁车站基坑的最大尺寸 620.5m × 22.5m, 最大开挖深度超过 40m。上海软土地基的基坑工程实践具有代表性, 其理论总结也有较高水准。地面沉降问题仍较突出。据相关文献披露, 在 20 世纪 80、90 年代施工的深基坑工程有近 1/3 曾存在不同程度的环境地质问题^[7]。上海深基坑工程的建设施工, 是近年来城区地面沉降新的影响因素之一^[8]。对深基坑工程进行专门的地面沉降危险性评估非常必要和迫切。而目前尚缺乏相应的评估理论与方法可借鉴。本文结合相关工作, 对此进行探讨, 以丰富和完善地质灾害危险性评估理论与实践, 并对实际工作起到一定的指导和推进作用。

2 深基坑工程地面沉降效应

2.1 影响因素

上海地区通常将开挖深度大于 7m 的基坑工程称为深基坑工程^[9]。而在中心城区因周围环境复杂和要求严格, 将标准提高至开挖深度超过 5m 即作为深基坑工程^[10]。深基坑工程的地面沉降主要受地质条件与基坑施工方式两大因素的影响。

2.1.1 地质条件

(1) 地下水状况

上海地区埋深 75m 以浅的地层赋存有与深基坑工程密切相关的潜水、微承压、第一、二承压含水层。除第二承压层以外的上部其它含水层, 历史上极少开发利用。基本处于自然状态。第二承压层除建国初期有大量开采以外, 近 40 年来开采量锐减, 且开采强度持续保持低水平。该层是中心城区地下水人工回灌的主要层位^[11]。

上海的潜水位埋深在 1.5~2.5m; 微承压含水层

收稿日期: 2008-01-22; 修回日期: 2008-02-20

基金项目: 国土资源部首批百名优秀青年科技人才计划(2002-18); 上海市房屋土地资源管理局首个公开招标科研项目(fdz2006018)

作者简介: 龚士良(1965—), 男, 上海人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地面沉降研究。

顶板埋深 20~30m,厚 5~10m,水位埋深 6~8m;第一承压含水层顶板埋深 28~35m,厚 6~14m,水位埋深 8~10m;第二承压含水层顶板埋深 60~70m,厚 15~20m,水位埋深 15~20m。

上海的地下水位埋深浅、水头压力大,土体处于饱水状态。各含水层之间在部分地区存在沟通。高水头、高压力的地下水状况,容易使基坑工程产生突涌。因此,疏干与降压是上海深基坑工程通常采用的施工措施之一。

(2) 土体状况

上海浅部地层以海相沉积为主。在 75m 以浅存在三个软弱粘性土层,特别是地表下 40m 范围内普遍产出含水率大于 50%、孔隙比超过 1.0、呈流塑态的饱和淤泥质粘性土层。

基坑开挖涉及的地层不仅自身变形明显,更易受外界作用影响使变形加剧^[13]。而且软粘性土层的变形有显著的时间滞后,导致沉降的影响范围与持续时间更长。因此软土地区的深基坑工程,必须依托支护结构与止水帷幕,从而最大限度地减弱不利地质条件带来的工程危害。

2.1.2 施工方式

深基坑工程的设计施工方案是直接影响地面沉降实际表现的关键因素。其包括五个方面:

(1) 开挖深度

基坑开挖越深,规模越大,基坑边坡失稳的可能性及其由此引发的地面沉降危险性也越高。开挖方式对沉降也有一定影响,一般而言,放坡开挖方法简单、方便经济,环境影响相对较小。但城区施工场地局限,通常无法采用。

(2) 降水方式

基坑降水有时也作为地基加固、提高土体强度的经济实用的技术手段,故土体在强度提高的同时,必然产生附加沉降。含水层疏干和承压含水层的降压影响范围广,沉降效应明显。因此基坑降水是引发地面沉降的主要因素。

(3) 隔水帷幕

隔水帷幕可有效减少含水层降压或疏干过程中的沉降效应。隔水帷幕必须阻断含水层,其效果才较显著。由于部分隔水帷幕,如地下连续墙等,同时作为基坑支护结构,尽管其埋置深度远超基坑开挖深度,有时仍未彻底阻断降压目的层的承压含水层。基坑降水对外围的沉降影响仍然存在。

(4) 围护结构

深基坑工程的围护结构多为垂直的挡土结构。实际上也就是支撑体系。对于防止或减弱基坑的侧壁变形具有重要作用。可降低地面沉降的影响。深基坑工程的边坡失稳和塌方的可能性很高。基坑塌方将显著加剧地面沉降,引起严重的周围环境破坏。

(5) 施工工艺

不同的施工作业流程,其沉降效应也有明显差别。采用逆作法施工的地面沉降的影响范围与最大沉降量,要明显小于通常的施工方法。另外,降水、开挖、支护等深基坑施工的主要工艺配合应用,且根据地质条件分时段分步开挖,也能有效减弱地面沉降的实际表现。在坑内降水的同时在坑外回灌、开挖后及时浇筑结构底板减少基坑暴露时间等工艺措施,其沉降防治效果也很明显。

2.2 地面沉降机理分析

2.2.1 基坑降水的地面沉降机理

对于基坑降水而言,包括潜水层疏干的包气带、饱水带释水,以及承压含水层的抽水降压两类。其沉降机理与开采地下水引起地面沉降是相一致的。由于水位下降,土体有效应力增加,使地层增加附加荷载,引发土层压缩并表现为地面沉降。其沉降影响范围、最终沉降量以及沉降的变化发展,与降水作业进程、含水层水文地质特性、土体物理力学性质等密切相关。通过降水作用下地下水位及其地下水渗流场变化与土体变形的耦合,可对由此导致的地面沉降进行分析。

2.2.2 基坑开挖的地面沉降机理

基坑开挖也是土体卸荷的过程,由此引起坑底隆起。同时也引起挡土围护墙在两侧压力差作用下产生位移,并由此引发墙外土体位移。因此,基坑开挖引起的周围土体移动及其地面沉降效应,其主要原因是坑底的土体隆起与围护墙的位移变形,并直接影响地面沉降的实际表现。

坑底隆起是垂直向卸荷而改变坑底土体原始应力状态的反应。随着开挖深度增加,基坑内外的土面高差不断增大,荷载变化及应力差逐渐提高,将使围护墙外侧土体产生剪切应变,增加其向基坑的滑动趋势与动能,并由此导致或加剧地面沉降。

基坑开挖同时也使围护墙受力变形。在基坑内侧面卸去原有的土压力时,在墙外侧受到主动土压力,而在坑底的墙内侧则受到全部或部分的被动土压力。

围护墙的位移使墙体主动压力区和被动压力区的土体发生位移。墙外侧主动压力区的土体向坑内位移,使背后土体应力减小,剪力增加;而在基坑开挖面以下的墙内侧被动压力区的土体向坑内位移,使坑底土体应力加大,坑底土体剪应力增大而发生挤压和隆起。由于总是开挖在前,支撑在后,所以围护墙在基坑开挖过程中,安装每道支撑以前总是已发生一定的先期变形。在上海软粘性土中的深基坑,墙体变形和坑底隆起不仅在施工阶段,而且由于土体受到扰动,在施工后期,基坑周围地层还有相当长时间的固结沉降。

2.3 地面沉降变化规律

2.3.1 地面沉降量与地面沉降范围

根据近年来深基坑工程典型案例的剖析与总结,地面沉降量与开挖深度有一定关系。开挖越深,沉降渐增。一般而言,开挖深度为 15m 和 30m 的最大沉降量分别可达 20mm 和 30mm 左右。地面沉降最大点通常在坑壁近旁。受围护墙等支护结构的阻隔影响,外围地面沉降的极大值一般在距基坑 10m 处。地面沉降随距离的变化大致呈指数型衰减。沉降主要集中在开挖深度 1~2 倍的平面范围内。开挖深度为 15m 左右及以浅的基坑,在 2 倍开挖深度范围处的地面沉降量已很微弱;开挖深度超过 20m 的基坑,其地面沉降影响范围则有所扩大(图 1)。

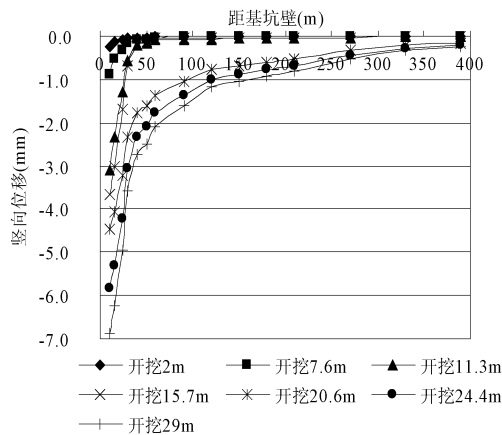


图 1 不同深度基坑地面沉降与距离变化曲线

Fig.1 Relationship curves of land subsidence with distance on difference deep excavation

综合工程实例与分析结果,以 30m 开挖深度的基坑为例,不同距离的沉降量变化见表 1。部分基坑因客观因素制约,实际沉降量可能较表中数据偏大。

表 1 深基坑工程地面沉降特征(开挖深度 30m)

Table 1 Feature of land subsidence on excavation engineering (deep 30m)

距坑壁距离 (m)	开挖深度(H) 倍数	地面沉降量 (mm)	占最大沉降比例 (%)
0	—	20~30	100
10	—	6~10	25~35
30	1	3~5	10~15
60	2	2~3	5~10
90	3	1.5~2.0	4~8
120	4	1.0~1.5	3~6
180	6	0.8~1.0	2~5
300	10	0.5~0.6	1~2
450	15	0.2~0.3	0.5~1.0

由此可以看出,在距坑壁 10m 处的沉降量为 6~10mm,为坑旁最大沉降量的 1/3~1/4。在 2 倍开挖深度(2H)范围处,沉降量通常约为 2~3mm,约为最大沉降量的 10%;6H 处已降至 2%~5%,10H 处为 1%~2%,15H 处已不足 1%。

2.3.2 水平位移

总体上基坑坑壁的水平位移随开挖深度的增加而递增,在接近开挖设定深度处位移量最大,之后逐步减小。水平位移量在垂向上的分布不对称,通常衰减过程要略缓于增长过程。地层发生水平位移的具体情况,与围护结构埋设深度有一定关系。不同开挖深度的基坑坑壁水平位移如图 2 所示(向基坑内位移以为“-”)。

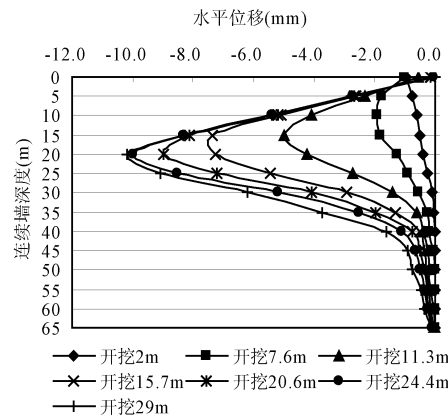


图 2 不同开挖深度基坑水平位移变化曲线

Fig.2 Relationship curves of horizontal locomotion on difference excavation deep

2.3.3 受力弯矩

坑壁最大弯矩随开挖深度增加而加大,最大弯矩作用点不断下移,一般在开挖最大深度处。受力弯矩变化围绕基坑支护结构,呈现向基坑内与往基坑外的

交替,反映了不同深度地层的应力变化,并在基坑坑壁的围护结构墙上得到受力体现。不同开挖深度基坑坑壁围护墙受力弯矩如图 3 所示(向基坑内弯为“-”)。

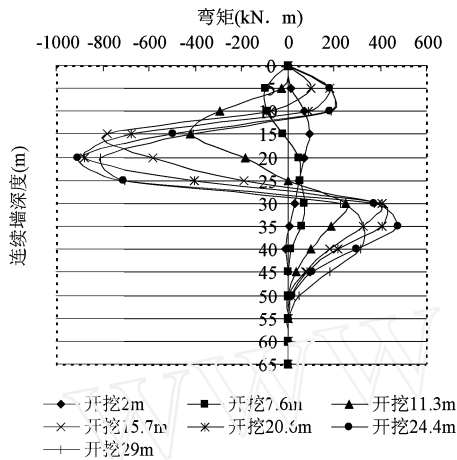


图 3 不同开挖深度基坑围护墙受力弯矩变化曲线
Fig.3 Relationship curves of mechanical torque on timbering wall in difference excavation deep

3 深基坑工程地面沉降评估方法

3.1 评估技术准则

深基坑工程的地面沉降危险性评估,同样必须执行国务院、国土资源部、上海市的相关法令和技术要求^[16-18]。对工程遭受地面沉降的危险性和在建设、建设后引发或加剧地面沉降的可能性作出评价,并提出防治措施与建议。深基坑工程尽管是某一建设项目的工程,但由于基础施工阶段的地面沉降效应在整个建设项目中占绝大部分,故《上海市地面沉降防治管理办法》对此作了专门规定。并明确深基坑的设计施工方案须有针对性的地面沉降防治对策。并须通过技术评审论证后方可施工。

由此,上海深基坑工程的地面沉降评估,其目的不在于申请建设用地,而是为工程建设和地质灾害防治服务的专业技术工作,是为完善工程的设计与施工方案而展开的针对性工作。所以其评估可在详勘或设计阶段进行。深基坑工程的地面沉降评估,是对该工程所属的建设项目地质灾害危险性评估的深化和补充。由于其评估在工程节点时间上的适当后移,基础资料掌握程度大有提高。因此对评估的针对性、分析的定量化、结论的科学性、建议的实际可操作性提出了更高要求。

3.2 主要评估内容

深基坑工程地面沉降的危险性评价,应通过最大沉降量与影响范围的量化分析,验算基坑监测与控制的主要影响范围的外边界的沉降量到底还有多少,在工程上可以忽略的或设计规程许可的沉降量还会有多大的环境影响,会对区域沉降量有多大叠加作用;并通过这一验算过程,对沉降量偏大的设计施工方案进行优化完善,使沉降效应得到明显减弱。深基坑工程的地面沉降评估,特别应着重于不良水文地质、工程地质条件的内在因素及在工程活动作用下引发的地质灾害风险评价。侧重于含水层疏干降压与土体开挖卸荷等影响下的地面沉降效应分析与灾害预测,对降水方式及井位布置与降排水量、开挖程序、支撑结构型式、回灌井的布设与水量核定等工程方案进行专门研究与技术论证。藉此明确地面沉降防治前提下设计施工方案的科学比选与合理优化的实施方案。这是评估中的关键技术环节与工作要点。

3.3 重点评估区域

由于现行的上海深基坑工程的相关技术规程,将开挖深度的 2 倍平面范围作为沉降监测与控制的重点^[20]。因此,深基坑工程的地面沉降评估,不仅要着重于 2 倍开挖深度范围,也应分析评价其外围的地面沉降及与区域地面沉降的相互影响。根据前述对沉降效应的动态特征与规律的初步阐述,深基坑工程的沉降影响最远可达 10~15 倍开挖深度。由此,深基坑工程地面沉降危险性评估区的范围,至少应达到基坑开挖深度的 15 倍。即必须全部涵盖基坑工程产生沉降影响的最远边界。同时结合场地地质条件特征及所在区域地面沉降发育现状等背景情况,对评估区范围进行适当外扩,以全面分析评价深基坑工程的地面沉降影响。

3.4 危险性分级指标

由于深基坑工程的地面沉降防治及其监控区域,应兼顾行业管理与职能分工协同配合的客观实际。建设施工方是工程沉降的防治主体与责任单位。因此深基坑工程的区域沉降控制指标,并不单纯表示基坑施工范围内地面沉降的异常变化,而更侧重的是其主要影响范围以外对区域沉降的综合影响。按照上海相关的政府管理规章,已明确了 2 倍开挖深度范围内是工程建设施工单位的责任区域。其外围的沉降影响,则可以纳入区域地面沉降防治的管理工作范畴。应作为地质行政主管部门的职责范围。基于此,

本文提出初步的上海深基坑工程的沉降控制指标为:在2倍开挖深度的平面范围外边界,沉降量控制值应低于3mm。亦即在基坑施工中应确保在其主要影响范围的外缘,最大沉降量不超过3mm;在开挖深度的6倍处,其沉降量控制值应低于1mm。

上述控制指标的拟定,首先是考虑到深基坑工程的沉降控制是城市整体地面沉降防治工作的重要组成,实际工程的沉降控制标准理应更严格,方能保证总体目标的实现;另一方面,由于工程的沉降影响存在相互交叉与叠加,年内可能同一区域有多个工程相继施工,若单个工程的沉降控制标准偏于宽松,对年度沉降将带来不利影响;再次,目前的技术手段可以达到既定的指标,落实该标准有现实可能与实际可行性;另外,为便于跟踪监测与质量监控,控制指标应充分考虑测量仪器的工作精度,指标过于精细其实缺乏实际的应用意义,故以6倍开挖深度的毫米数量级进行确定,而不采用10倍或15倍的影响外边界作为指标划分依据。

初步拟定的深基坑工程地面沉降的控制指标暨危险性分级标准(表2)。在深基坑工程地面沉降评估中,应结合沉降量与沉降范围的估算结果,对其进行危险性分级。对地面沉降危险性分级除主要考虑最大沉降量以外,也应考虑沉降速率的变化。对于2~15倍开挖深度范围内,可根据沉降的实际表现与变化趋势,再划分重点控制与一般控制区段。只有在基坑工程切实落实沉降控制措施的前提下,方能从根本上减弱其对周围环境与区域沉降的影响。这是地面沉降控制的关键,也是地面沉降控制的主体。对于危险性处于中等或危险性高的,应对原设计施工方案提出修改完善与优化建议的相应技术措施。从而确保基坑工程与周围环境的安全。

表2 深基坑工程地面沉降危险性分级

Table 2 Grade of land subsidence risk of deep excavation engineering

分级指标	危险性分级		
	低	中	高
最大沉降量(mm)			
2倍开挖深度范围处	<3	3~5	>5
6倍开挖深度范围处	<1	1~3	>3

4 结语

深基坑工程的地面沉降效应是近年来影响上海区域地面沉降发展的因素之一。加强对深基坑工程

的地面沉降控制是全市地面沉降防治工作的重要内容。强化专门的地面沉降评估,并以此完善和优化工程的设计施工方案。既可保障工程安全,也有助于城市地质生态环境的保护。这是地质工作为社会服务,使科技成果转化为实现生产力的重要途径和方式。以深基坑工程地面沉降评估为纽带,密切产、学、研联系和一体化建设,加强行业与专业的融合,共同深化地质灾害防治的理论与实践。应建立健全和积极推行深基坑工程地面沉降的专项评估制度。将深基坑工程的地面沉降评估制度化、规范化。同时,加强对深基坑工程地面沉降的监督管理。对于目前尚处于管理盲区而数量又较可观的基坑降水的抽、排水量,应建立和完善相应的机制。使这部分地下水开采量纳入当地地质环境监测统计报表。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] 龚晓南,高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [3] 高大钊. 深基坑工程(第2版)[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [4] 姚天强,石振华. 基坑降水手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [5] 王卫东,吴江斌,黄绍铭. 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(4):547-553.
- [6] 白廷辉. 上海轨道交通深基坑工程新技术与实践[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(4):554-560.
- [7] 黄绍铭,高大钊,孙更生. 软土地基与地下工程(第2版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [8] 龚士良. 上海城市建设对地面沉降的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):108-111.
- [9] 上海市人民政府. 上海市地面沉降防治管理办法[Z]. 2006.
- [10] 上海市建设和交通委员会. 上海市深基坑工程管理规定[Z]. 2006.
- [11] 龚士良. 上海地下水资源系统开发与管理[J]. 管理工程学报,1999,13(1):47-49.
- [12] 邱金波,李晓. 上海市第四纪地层与沉积环境[M]. 上海:上海科学技术出版社,2007.
- [13] 龚士良. 上海软粘土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究[J]. 工程地质学报,2002,10(4):378-384.
- [14] JG 120-99, 建设部标准《建筑基坑支护技术规程》

- [S].
- [15] DBJ 08 - 61 - 97, 上海市工程建设规范: 基坑工程设计规程[S].
- [16] 国土资源部地质环境司, 国务院法制办公室农业资源环保法制司, 国土资源部政策法规司. 地质灾害防治条例释义[M]. 北京: 中国大地出版社. 2004.
- [17] 国土资源部. 地质灾害危险性评估技术要求[Z]. 2004.
- [18] DG 08 - 2007 - 2006, 上海市工程建设规范: 建设项目地质灾害危险性评估技术规程[S].
- [19] 龚士良. 上海地区地质灾害危险性评估关键技术问题研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 92 - 96.
- [20] DG/TJ 08 - 2001 - 2006, 上海市工程建设规范: 基坑工程施工监测规程[S].

Theory and methodology on assessment of land subsidence caused by excavation engineering for deep foundation pit in Shanghai

GONG Shi-liang^{1,2}, YE Wei-min³, CHEN Hong-sheng¹, CHEN Bao³, YANG Tian-liang¹, WAN Min³

(1. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China;

2. Center for Land Subsidence of China Geological Survey, Shanghai 200072, China;

3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The deep excavation is an important foundation engineering for high building, subway and tunnel, underground space exploitation and others in city construction. With the intensive usage of land exploitation, the depth and dimension of excavation are improved. The deep excavation engineering has striking effect on regional land subsidence, but no one risk assessment of land subsidence existed so far. According to the theory and case analysis, engineering device have immediate effect on land subsidence, and the aquifer unwater or abase is predominant factor. The paper proposes that the influence assessment of deep excavation engineering to land subsidence should be 15 times the depth of excavation, also suggests the technical rules and wok points of risk assessment of land subsidence on deep excavation engineering.

Key words: deep excavation engineering; land subsidence; risk assessment; technologic methodology; Shanghai City

本刊加入“万方数据 - 数字化期刊群”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,我刊现已入网“万方数据 - 数字化期刊群”。为此,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律由编辑部统一纳入“万方数据 - 数字化期刊群”,进入因特网提供信息服务。凡有不同意见者,请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付。“万方数据 - 数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。本刊全文内容按照统一格式制作,读者可上网查询浏览本刊内容,并征订本刊。

《中国地质灾害与防治学报》编辑部