残积填土降雨渗流变形数值模拟分析

刘毓氚[1]，邱路阳[1]，李大勇[2]

（1. 福州大学土木工程学院，福建 福州 350002；2. 山东科技大学土木建筑学院，山东 泰安 271019）

摘　要：许多研究已经证实了降雨引起的渗流能降低填土稳定性，特别是对于非饱和残积填土。降雨能使残积填土内形成渗流潜蚀破坏，并使地下水位和孔隙水压力发生变化，导致抗剪强度下降形成潜在破坏面，最终发生破坏。本文利用有限元数值分析研究降雨强度与降雨持续时间对于福建地区残积填土的影响，发现降雨强度变大或持续时间延长都能使残积填土内的地下水位上升，局部区域孔隙水压力增大，渗流速率也发生变化，从而影响残积填土的稳定性。另外，证实了存在降雨临界持续时间，一旦降雨持续时间超过了临界持续时间，地下水位线高度随降雨持续时间变长而降低，安全系数就转而变大。

关键词：残积填土；渗流；降雨

作者简介：刘毓氚(1971－　)，男，博士，教授，硕士生导师。

0　引　　言

福建气候湿热多雨，风化作用强烈，斜坡上残积、残坡积物发育，并且残积土多作为填土的主要材料，厚度一般数米至数十米，以粉质砂土为多。

造成残积填土坡滑塌的因素非常多，但是降雨入渗引起的填土滑塌是最常见的。许多专家对雨水入渗的过程以及土层中的渗流已经做了相当多的研究，对入渗水或浸润线扩散引起的填土变形破坏直至滑塌等现象都做了相应的理论分析，从而提出了一系列的理论公式和数值模型用以描述土中的渗流[1]。

计算渗流引起的变形或损失，流量是个关键参数，而在工程中考虑最多的是孔隙水压力，因此应着重考虑土中孔隙水压力的状态变化，而不是流量的大小。无论孔隙水压力是正是负，都与土体的抗剪强度以及体积变化特性有直接的关系。

实际上，残积填土非饱和区域的地面条件十分复杂，比如降雨强度、降雨持续时间等会影响地下水位线的位置，并且要预测出较为可靠的孔隙水压力分布也是十分困难的。相对于其他地质力学而言，人们对于坡体稳定性计算中多变的边界、地面和水文条件下渗流的影响了解还是较为贫乏。

本文利用有限元数值分析系统地研究降雨强度与持续时间对于福建地区残积填土的影响，了解地下水位、孔隙水压力分布、渗流速率以及填土的稳定性发生的变化。

1　有限元数值模型

图 1 表示了残积填土的有限元数值模拟模型。残积填土坡体为 $1H:1V$ 的填土坡，假定经过了削坡处理，设有三级，每级高度为 10 m，并每级设有 4 m 宽的台阶，按福建残积填土特点，分为两层均质土，参数如表 1。

本次数值模拟实验采用的软件是 SEEP/W[2]。SEEP/W 用于地下渗流分析，是一个有限元分析软件，利用土－水特征曲线以及渗透系数来分析地下渗流及含水孔压力分散集中，使用 SEEP/W 可分析从简单的饱和稳态到复杂的不饱和时变。

另外，每层土的土水曲线以及渗透系数曲线参照 SEEP/W 中提供对应土的数据进行了一定的修正，但基本保持了曲线的走势和形状，已经足够满足本次数值模拟实验的准确性，第一层粉质砂土和第二层粉粘土饱和渗透系数分别假定为 5×10^{-6} m·s^{-1} 和 2×10^{-7} m·s^{-1}，如图 2 和 3。

表 1　土层主要物理力学参数

土层	γ/(kN·m^{-2})	c'/kPa	φ'/(°)
填土（粉质砂土）	17.5	17.8	19.8
粉粘土	19.0	20.0	25.0

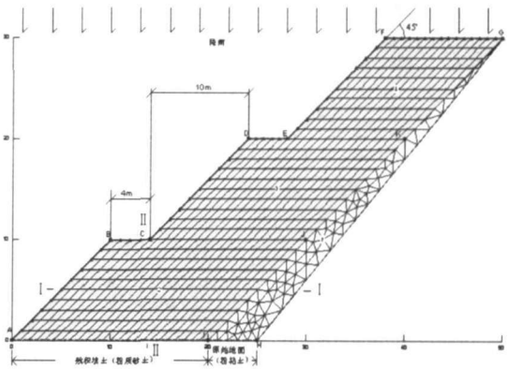
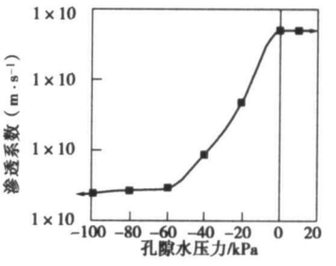


图 1　有限元数值模拟模型



基金项目：福建省自然科学基金资助项目（D0310009）；福建省教育厅资助项目（JA03011）；福州大学科技发展基金项目（2003-XQ-17）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

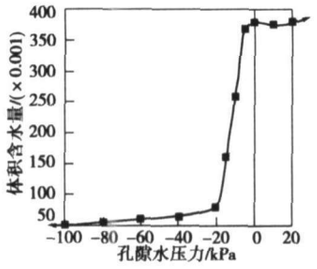


图2 残积填土（粉质砂土）渗透性曲线与土－水特征曲线

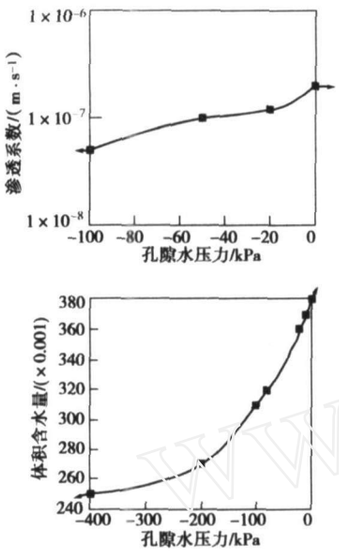


图3 原始地面（粉粘土）渗透性曲线及土－水特征曲线

2 分析结果讨论

2.1 降雨强度的影响

以往对于降雨引发填土坡体破坏的分析都是基于统计的方法。Vargas[3]和 Brand[4]将滑坡数目与降雨强度做了一定的相关分析，认为当暴雨时降雨强度超过了一个界限值，滑坡发生的可能性将变得很高，在香港这个界限值一般为 70 mm/hr 。然而，大部分这种统计数据不能反应出各个填土坡体所在地的原始地质条件和水力条件以及土体孔隙水压力变化对于填土坡体破坏的影响。

为了表现短暂的降雨强度对于残积填土坡体内孔隙水压力和坡体稳定性的影响，在应用 SEEP/W 模拟的数值模型中，根据福建省的降雨强度特点以及降雨持续时间，选择了不同的日降雨强度以及对应的降雨持续时间。将降雨强度转化为入渗率 flux（Q）数值，x 与 y 方向的渗透系数比（k_x/k_y 即 K-Ratio）为 1，初始地下水位线，同时忽略水分从地表蒸发的影响，如表 2 所示。

表 2 数值模拟的参数

代　号	降雨强度 /(mm/d)	降雨持续时间 /d	注释
$i1$	100	3	$i1$、$i2$、$i3$ 为不同的降雨强度
$i2$	150	3	
$i3$	200	3	
$d1$	100	3	
$d2$	80	5	$d1$、$d2$、$d3$、$d4$、$d5$ 为不同的降雨持续时间
$d3$	60	7	
$d4$	40	15	
$d5$	20	30	

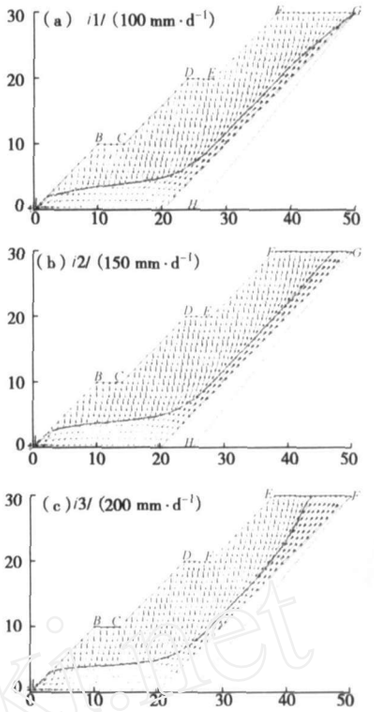


图4 不同降雨强度条件下地下水位线的抬升情况

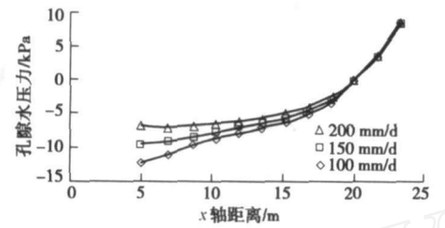
为了比较残积填土坡体内地下水位线和孔隙水压力分别与降雨强度之间的关联作用，通过数值模拟计算的得出了不同降雨强度条件下地下水位线抬升的状况，如图4。图4中只能看出,当降雨强度变大，坡顶的饱和区域随之加大，渗流向量更为密集，而坡底的地下水位都有很大幅度提高，但区别不明显。由于坡底地下水位上升的最快最多，为了更加准确体现坡体内的孔隙水压力与渗流速率的变化，着重选择了坡底两个关键断面Ⅰ-Ⅰ和Ⅱ-Ⅱ断面进行分析，如图1中所示。

同样的，孔隙水压力随降雨而发生变化的情况也与实际情况相同，孔隙水压力随深度发生线性变化，如图5和6。不同雨强情况下，在Ⅰ-Ⅰ断面上孔隙水压力为0点都在一个位置，即浸润线从粉粘土层上表面开始向坡表前进了大约2 m的距离，说明水分都向下汇集，地下水位（浸润线）在 x 轴方向上比较难扩散；图5（b）中Ⅱ-Ⅱ断面上孔隙水压力为0处，$i3$的曲线所在的y轴高度较大，其次为$i2$的曲线，最后为$i1$，虽然三者所在的位置差异并不大，但还是能看出地下抬升的高度与降雨强度有一定的比例关系，即降雨强度越大地下水位抬升的高度越大。

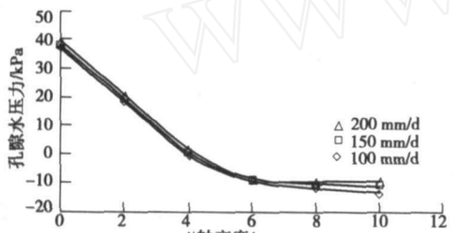
降雨强度为200 mm/d 为情况下，渗流速率v随深度不断减小，而在降雨强度为150 mm/d 和100 mm/d 情况下，渗流速率随深度变化初始阶段先上升随后再下降。造成差异的原因在于降雨强度较小时，坡表土体水分持续向下流动土体的孔隙才能继续接收降雨的入渗，而接近土表处土体的孔隙间水分已经形成一定渗流，所以表现出来的速率比较大。而降雨强度较大时，这种过程就不明显，渗流速率也就不会发生起伏。在土体达到饱和的区域，由于水分没有可以渲泄的渠道，使得孔隙间水分的流动就显得更加缓慢，如图6。另外，对于Ⅰ-Ⅰ断面上 x 轴距离为20～25 m处渗流速率重新增大的现象，主要是因为上部土体中渗流水的不断补充，地下水位抬升，水力坡降增大所致，从而使之发生潜蚀与冲刷，如图6（a）。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

将SEEP/W中分析的到的地下水位线以及孔隙水压力的分布加载进SLOPE/W中计算，即可得到关于不同降雨强度对残积填土安全系数产生影响的曲线，如图7。SLOPE/W是采用Morgenstern-Price极限平衡法和修正后的Mohr-Coulomb破坏准则计算土质和石质边坡（含路堤）的安全系数。最小安全系数的选择主要根据可能破坏滑动面而定，由于许多破坏土体都是沿着填坡前的原始地面或上下土层接触面而滑动，因此，取沿第二层土上表面而滑动的最不利面的安全系数为参考值。于是分别得出了不同降雨强度情况下具有最大可能性滑动面时的安全系数，如图7。在降雨没有发生时，残积填土坡体的安全系数为1.145，随着降雨强度增大安全系数逐渐减小，数值0.9～1。安全系数的减小主要是降雨强度增大，基质吸力减小以及孔隙水压力升高抗剪强度随之下降的结果。

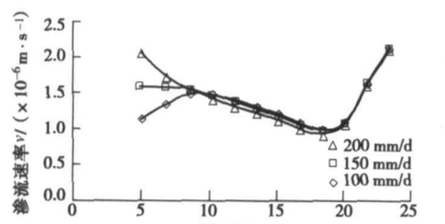


（a）Ⅰ-Ⅰ

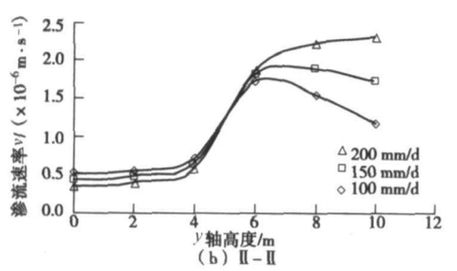


（b）Ⅱ-Ⅱ

图5 关键断面上各点的孔隙水压力与降雨强度的关系



（a）Ⅰ-Ⅰ



（b）Ⅱ-Ⅱ

图6 关键断面上各点的渗流速率v与降雨强度的关系

2.2 降雨持续时间的影响

许多研究者花费了相当长的时间研究分析了降雨持续时间的长短与填土坡体稳定性之间的联系，大多数人都是通过搜集降雨和滑坡的数据进行经验性的判断分析，比如研究者Peck[5]与Lumb[6]就认为10～15 d的降雨足够破坏填土坡体的稳定性。

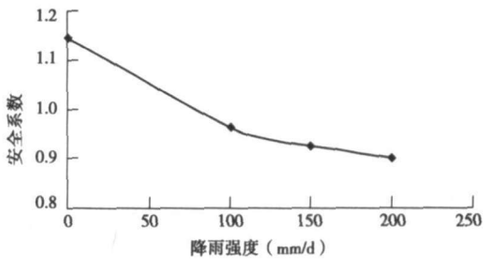


图7 安全系数与降雨强度的关系

Brand[4]和Premchitt等[7]利用自动雨量进度记录仪获取更加精确的雨量分布与强度的数据，通过数据的比较分析认为大部分滑坡是由局部持续性短时强降雨引发的。然而，所有的降雨与填土坡体破坏数据的搜集分析都忽略了所在位置的地质条件和土层的水力特性[1]。

本文根据以往资料，在数值模拟分析中设定了降雨量与持续时间对应的参数，如表2。

从图8中可以看出随着降雨时间的延长，虽然降雨强度减小，饱和区域还是有比较大的扩散。随着时间的延长，两个断面中孔隙水压力为零的点向坡体表面处和高处移动。当持续时间达到15 d或者30 d时，Ⅰ-Ⅰ断面下的土体已经基本位于地下水位线以下，即达到了饱和。另外，随着时间的推移，浸润线的上缘会逐渐下移，因为坡顶处的土体水分持续下流,虽然降雨持续，但入渗量不能马上填补水流流走而遗留的孔隙，使得坡顶非饱和区逐渐增大，而坡底的水分持续增加，饱和区也随之增大。

从图10中可以看出，持续降雨15 d或30 d后，靠近坡脚表面处的渗流速率比较大，比如Ⅰ-Ⅰ断面上 x 轴距离为5～10 m的点。这一情况从图8（d）和（e）也可以反映出，坡脚处的渗流向量比较集中而且长度较长，说明此处的渗流速率和渗流量都较大。因此，如果降雨持续时间足够长，在坡脚率先发生变形破坏的可能性就越大。

在降雨持续时间与安全系数的关联性方面，C.W.W.Ng[1]等人认为存在一个“临界持续时间”，降雨持续时间少于临界持续时间时，随着持续时间的增大，地下水位线抬升使得安全系数逐渐减小，一旦降雨持续时间超过了临界持续时间，地下水位线高度随降雨持续时间变长而降低，安全系数就转而变大。

这个临界持续时间的存在同样被许多研究者所证实，Vaughan[8]认为边坡破坏会发生在降雨持续了3 d的时候。Costa Nunes[9]等人分析了边坡破坏情形，认为只有当降雨持续时间达到了18 d滑坡才能出现。Senanayaka 等[10]分析了Sei Lanka地区的边坡破坏，分析结果认为当3 d时间内降雨强度持续维持在200 mm/d，发生滑坡灾害就迫在眉睫了。图11中表示了安全系数随降雨持续时间变化而变化的曲线，安全系数先随降雨持续时间增加而逐渐减小，但是当超过15 d后，安全系数反而有所增大。因此，这与针对香港地区残积填土坡体所做的分析有所类似，但不尽相同，主要表现在临界时间的数值上。针对福建残积填土特点，从本次实验结果可以看出，临界持续时间大约在15

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

d左右。降雨持续时间在15 d之内，安全系数随时间而减小，残积填土发生滑坡的可能性随时间而增大，而超过15 d后，安全系数有所增大。

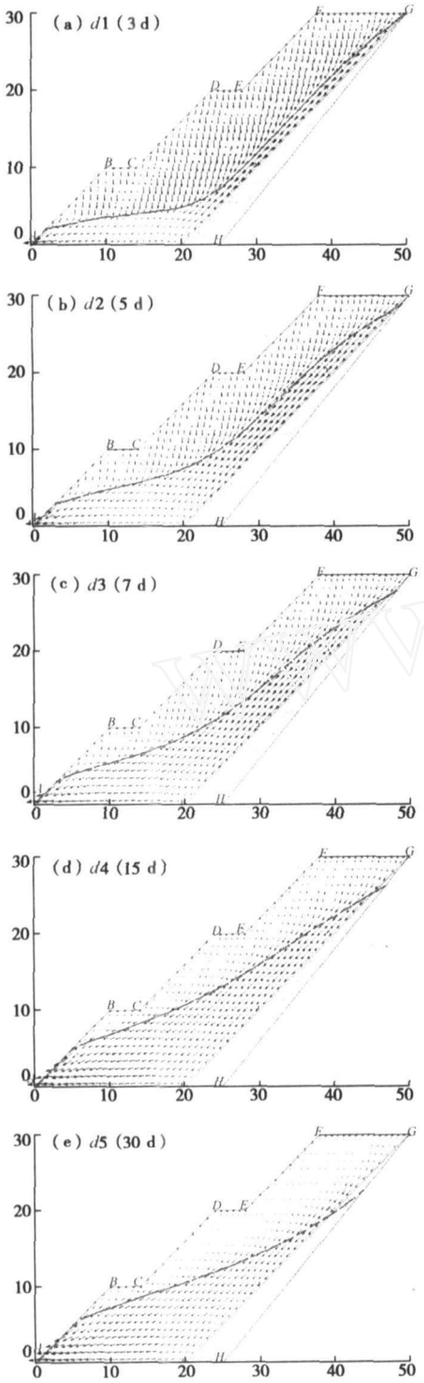
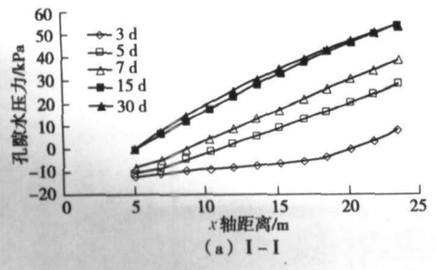


图8 不同降雨持续时间地下水位线的抬升情况



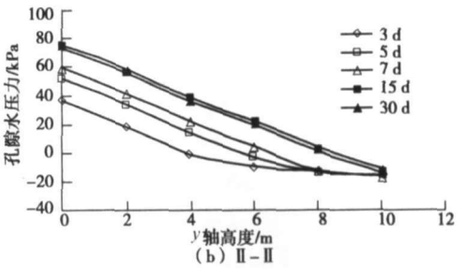


图9 关键断面上各点的孔隙水压力与降雨持续时间的关系

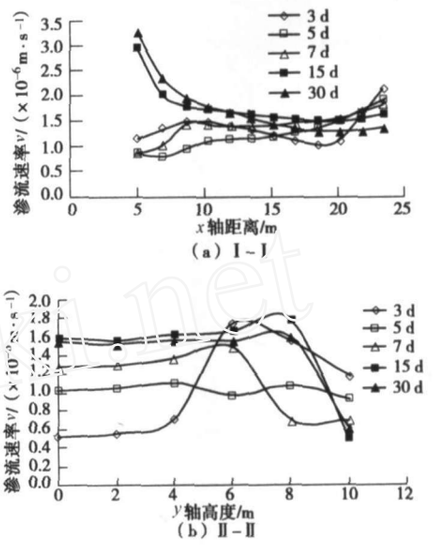


图10 关键断面上各点的渗流速率 v 与降雨持续时间的关系

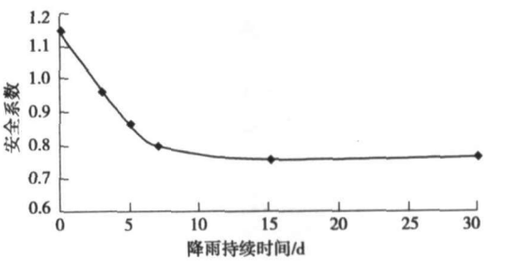


图11 安全系数与降雨强度的关系

3 结　论

通过一系列有限元数值模拟，分析了变化的降雨对于非饱和残积填土的暂态渗流和坡体稳定性的影响，可以证实了当降雨强度变大或降雨持续时间延长，都会发生地下水位抬升，出现局部饱和区域，一些区域渗流速率变大，从而影响残积填土坡体稳定性。最显著的是大量水流会向坡脚集中，导致坡脚容易率先发生破坏。

另外，证实了存在一个“临界持续时间”，降雨持续时间少于临界持续时间时，随着持续时间的增大，地下水位线抬升使得安全系数逐渐减小，一旦降雨持续时间超过了临界持续时间，地下水位线高度随降雨持续时间变长而降低，安全系数就转而变大。对于福建地区内以粉质砂土为主的残积填土，发生破坏可能性最大的临界持续时间大

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

约为 15 d。

参考文献:

[1] NG C W W, SHI Q, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. Computers and Geotechnics. 1998, 1: 1 - 28.

[2] GEOSTUDIO. Seepage Modeling with SEEP/W, Geo-slope International Ltd[M]. Canada, 2004.

[3] VARGAS M. Effect of rainfall and ground water levels[C]//. Proc. 4th Pan American Conf. Soil Mech.& Fnt Engg San Juan Puerto Rico. 1971: 138 - 141.

[4] BRAND E W. Landslides in south Asia: a state-of-art report[C]// Proc 4th Int Sym on Landslides.Toronto, 1984, 1: 17 - 59.

[5] PECK R B. Stability of natural slopes[J]. J Geotech Engng Div Am Soc Civ Engrs, 1967, **93**(4), 403 - 418.

[6] LUMB P B. Slope failures in Hong Kong[J]. Quart J Engg Geol, 1975, 8: 31 - 65.

[7] PREMCHITT J, BRAND E W, PHILLIPSON H B. Landslides caused by rapid groundwater changes. Groundwater in Engineering Geology[C]// Proc 21st Annual Conf Engg Group of Geol Society. London, 1986: 87 - 94.

[8] VAUGHAN P R. Pore pressures due to infiltration into partly saturated slopes[C]// Proc 1st Int Conf Tropical, Lateritic and Saprolitic Soils. Brasilia, 1985, 2: 61 - 71.

[9] COSTA Nunes A J, COUTO Fonseca A M, COUTO Fonseca. Intense rainstorms and ground slides[C]// Proc 12th Int Conf Soil Mech & Fnt Engg Rio de Janeiro. 1989: 1627 - 1630.

[10] SENANAYAKA K S, SITHAMPTON P M, HERATH N W. Salient aspects of landslides in dri lanka[C]// Proc 13th Int Conf Soil Mech & Fnt Engg. New Deldi, 1994: 3: 1103 - 1106.

[11] LAM L, FREDLUND D G, BARBOUR S L. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach[J]. Can Geotech J, 1987, **24**: 565 - 580.

[12] 邱路阳, 刘毓氚, 李大勇. 高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策研究[J]. 岩土力学, 2005. (已录用)

www.cnki.net

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net