

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.006

北京地区基于不同地面沉降阈值的地下水位控制分析

姜 媛,田 芳,罗 勇,周 毅,刘明坤
(北京市水文地质工程地质大队,北京 100195)

摘要:城市地面沉降是对城市规划建设、经济发展和人民生活构成威胁的地质灾害。为了探究地下水位与地面沉降的关系,本文对北京顺义地区天竺地面沉降监测站多年分层地面沉降及对应含水层组地下水位监测数据进行统计分析,建立了该地区基于累计沉降量与含水层组水位标高、水位变幅及水位波动的多元回归模型,并对所建立的回归方程进行了检验,研究分层地面沉降与地下水位变化的定量关系,并结合《全国地面沉降防治规划(2011—2020)》中北京市的控沉目标,设置该地区不同地面沉降速率控制阈值,计算得到各层位达到控制阈值时所对应的地下水位,为下一步合理调整地下水开采层位,开展地面沉降防控工作提供科学依据。

关键词:地面沉降;地下水位;多元回归分析;控制阈值

中图分类号:P642.26

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2015)01-0037-06

Groundwater control target under different threshold of land subsidence in Beijing

JIANG Yuan, TIAN Fang, LUO Yong, ZHOU Yi, LIU Mingkun
(Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100195, China)

Abstract: The groundwater in Beijing has been excessively exploited in long time, causing the groundwater level continues to decline and the ground subsidence areas to keep expanding, which restrain the economic sustainable development of Beijing. Factual data about layered water table and subsidence extent from 2004 to 2011 in the Tianzhu ground subsidence monitoring station are used to set up linear equations based on quarter average water table, water level variation and amplitude. After checkout of the linear equation, the layered water levels while subsidence achieving the control target are calculated, and it provides basis for controlling ground subsidence in this area.

Keywords: land subsidence; water level; multiple regression analysis; control target

0 引言

1999年以来北京遭遇连续干旱,近12年降水量减少19%。水资源供需矛盾突出,为保障首都供水安全,连续超采地下水。平原区地下水平均埋深从1998年末的11.9 m下降到2012年末的24.3 m,年均下降0.89 m,加剧了地面沉降。近年来,北京地面沉降中心最大年沉降速率连创历史新高,沉降区域面积不断扩

大,累积沉降量连年攀升,对城市建设影响日益明显。并且在未来一段时期内,影响地面沉降发展的水资源供需矛盾难以根本解决,地面沉降仍将持续快速发展^[1]。

多年研究成果表明,北京平原区地面沉降的主要诱因是持续超采地下水,其发展变化特征与地下水开采强度和开采深度的变化特点关系密切。地下水位变化与地面沉降发展具有良好的相关性,地下水位变化快慢与

收稿日期:2014-02-12;修订日期:2014-07-16

基金项目:北京市科技计划课题(Z131100005613022);北京新航城地区水资源可持续利用研究(Z131100005613001)

第一作者:姜媛(1984-),女,满族,硕士研究生,工程师,主要从事地面沉降方面的研究工作。E-mail:yuan.12.3@163.com

幅度直接影响着地面沉降的速度和大小,即地下水位变化是研究分析地面沉降变化发展的最直接的证据之一。

最新颁布的《全国地面沉降防治规划》对北京市提出了明确的近、远期地面沉降防控目标,结合北京市实际情况来看,地面沉降防控形势严峻。本文以顺义天竺地区作为典型研究区,研究建立分层地面沉降与地下水位变化的经验关系,探讨二者之间定量关系,并结合“规划”中北京市的控沉目标,设置不同地面沉降速率控制阈值,计算得到各层位达到控制阈值时所对应的地下水位,对分析预测该典型地区地面沉降发展趋势及防控具有重要意义。

1 地面沉降与地下水位相关性

近年来,天津、沧州、廊坊、德州等城市根据各地地面沉降监测数据及历史资料,建立了地面沉降与地下水位变化的经验关系。其中天津、沧州、廊坊的地面沉降量与地下水位变化总体呈指数相关关系,德州地面沉降监测开展较晚,在监测时段内呈现二次函数关系。1992 年用八王坟实测地面高程与月承压水水位进行了相关分析,得出二者存在很好线性关系的结论^[2-7]。

多年的观测数据显示,北京平原区地面沉降与地下水位的关系有以下特点:

从平面上看,地面沉降与地下水位下降漏斗的形态与分布范围具有相似性。从 1971 年北京市最早出现地下水降落漏斗至今,漏斗面积不断扩展,从局部的小漏斗发展至面积超过 1000 km²^[8]。对比北京平原主要开采层 2010 年地下水漏斗和 1955-2009 年累计地面沉降量(图 1)可以发现,地面沉降快速发展的昌平八仙庄、朝阳金盏、朝阳三间房、朝阳黑庄户以及通州区几大沉降中心都位于地下水降落漏斗之内。平谷地区出现新的地下水降落漏斗,也与近几年平谷地区地面沉降快速发展相一致。总体来说,北京平原区地面沉降发育严重区域与平原区地下水降落漏斗分布情况基本吻合。

从垂向上看,通过对长时间序列下区域地下水和监测站内地下水动态变化与地面沉降变化趋势的对比,以及监测站内不同深度含水层地下水位动态变化与分层地面沉降变化趋势的对比,可以看出:地面沉降变化趋势与地下水位动态变化具有良好的一致性,地下水位在反复升降中呈持续下降状态,地面沉降量呈持续增加状态,沉降速率的周期性变化与地下水位位的季节性反复升降过程吻合^[9](图 2、图 3)。

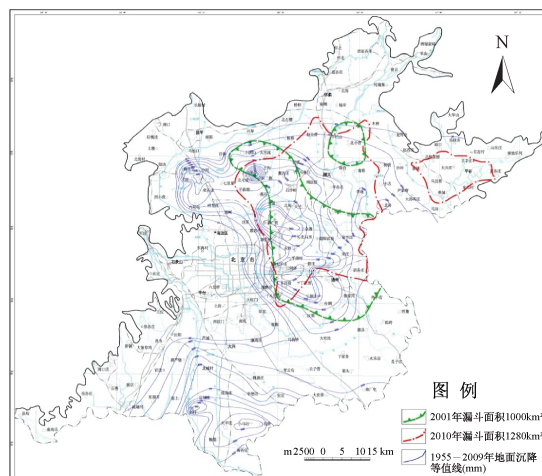


图 1 北京平原主要开采层 2001 和 2010 年地下水漏斗和 1955-2009 地面沉降分布对比图

Fig. 1 Comparison of 2001, 2010 groundwater depression and 1955-2009 land subsidence distribution

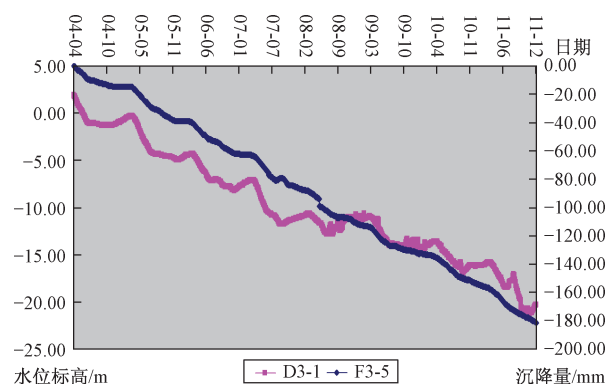


图 2 天竺站 F3-5 (102 m 以深) 沉降量与该层段内的 D3-1 水位标高

Fig. 2 Tianzhu station F3-5 (below 102 m) settlement with D3-1 level within the layer segment elevation

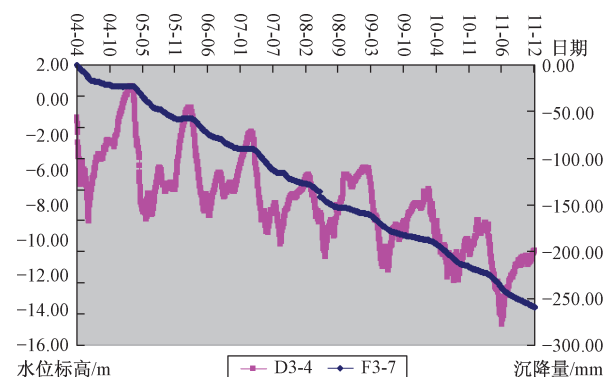


图 3 天竺站 F3-7 (64.5 ~ 82.3 m) 沉降量与相邻含水层 D3-4 水位标高对比

Fig. 3 Tianzhu station F3-7 (64.5 ~ 82.3 m) settlement with the adjacent D3-4 compare aquifer water level elevation

2 分层地面沉降量与地下水位相关性

北京市于 2002 年开始地面沉降监测网站预警预报系统一期工程建设,首批建成了天竺、望京、王四营三个地面沉降监测站,于 2004 年开始监测。二期工程四个站也于 2008 年竣工。各地面沉降监测站站内均建有基岩标、分层标、地下水动态监测孔和孔隙水压力监测孔在(表 1)。长时间序列下的分层

标监测数据及该层位连续的水位观测资料为进一步各层地面沉降量与地下水位相关分析奠定了良好的基础。

多元回归分析通过研究输入变量与输出变量的关系,建立预测模型,明确相互关系的密切程度,然后以输入变量为依据预测输出变量的变化,用一个拟合的数学关系式加以表示。通常,许多非线性回归问题可以化为多元线性回归问题^[10]。

表 1 天竺站各个分层标及对应含水层层位

Table 1 Layerwisemark and adjacent compare aquifer in Tianzhu station					
地下水位标号	D3-2	D3-3	D3-4	D3-5	D3-6
含水层层位深度	210 ~ 218	120 ~ 146. 8	85. 7 ~ 91. 3	59. 3 ~ 63. 4	27. 5 ~ 31. 0
分层标号	F3-3	F3-4	F3-6	F3-8	F3-10
观测层位深度	148. 5 ~ 218. 89	117 ~ 148. 49	82. 3 ~ 102	48. 5 ~ 64. 5	2. 4 ~ 35. 43
岩性	粉土细砂	粉土粗砂	粉粘细砂	细砂粗砂	粉土

2.1 回归方程的建立

历史监测资料显示,各监测层位的累计沉降量与该层所对应的含水层组地下水位相关程度较高。为进一步辨识二者之间内在关系,以天竺站 2004 - 2011 年各季度分层地面沉降及对应含水层组地下水位监测数据为基础,建立多元回归模型(式 1)。因变量为各监测层位季度累计沉降量,三个自变量分别为相应层位的季度平均水位标高、季度内水位变幅及季度内水位波动(表 2)。

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \tag{1}$$

式中:y——含水层组季度累计沉降量/(mm/a),沉降取“-”值,回弹取“+”;

x_1 ——含水层组季度平均水位标高/m;

x_2 ——含水层组季度内水位变幅/m;

x_3 ——含水层组季度内水位波动值/m;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \varepsilon$ ——回归方程系数。

2.2 显著性检验

变量 Y 与变量 X 之间的线性关系密切程度用复相关系数 R 表示,R 可以检验回归方程的显著性。复相关系数越大,表明样本点越靠近回归直线,其线性相关程度越大^[11],可认为方程有意义。复相关系数计算:

$$R = \sqrt{\frac{S_R}{S_T}}$$

回归平方和

$$S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

残差平方和

$$S_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

总偏差平方和 $S_T = S_E + S_R$

表 2 各监测层位多元回归分析结果

Table 2 Results of multiple regression analysis				
监测层位	回归方程	R	R_2	F
D3 - 2/F3 - 3	$y = 1.750x_1 + 0.108$	0.933	0.871	58.727
D3 - 3/F3 - 4	$y = 2.095x_1 + 0.662$ $x_2 + 2.038x_3 + 0.199$	0.926	0.858	52.227
D3 - 4/F3 - 6	$y = 1.219x_1 + 0.657$ $x_2 + 1.918x_3 - 5.240$	0.942	0.887	67.900
D3 - 5/F3 - 8	$y = 0.248x_1 + 0.092$ $x_2 + 0.128x_3 - 0.662$	0.894	0.800	34.673
D3 - 6/F3 - 10	$y = 2.190x_1 + 0.378$ $x_2 + 2.840x_3 - 37.338$	0.510	0.260	3.044

通过分析结果可以看出,除 D3-6/F3-10 监测层位外,其他层位多元回归方程的复相关系 R 均大于 0.8,表明地面沉降与上述因素呈高度正相关关系,模型的计算值与实测值的拟合精度较高^[12],因子的选择合理,具有代表性。而潜水水位(D3-6)与对应层位(F3-10)的沉降量之间相关性差。

另外还可以用 F 检验来评价方程的显著性。取显著性水平 $\alpha = 5\%$,查表可知 $F_{0.05}(1,28) = 4.196$,故认为在显著性水平为 0.05 的情况下,除 D3-6/F3-10 监测层位外的回归方程均具有显著性意义,所求出的回归方程是实用的。

2.3 回归方程的分析及优化

方程中季度平均水位标高变量的系数 β_1 为正号,反应水位标高与累计沉降量呈正相关关系(沉降量为负);季度内水位变幅变量的系数 β_2 为正号,反映水位

降幅越大,累计沉降量越大。此外,从回归方程系数来看,各监测层位累计沉降量受该层含水层组季度内平均水位标高影响最大,受到其他两个自变量影响稍小。

从实际观测的分层累计沉降量数据来看,各监测层位的地层累计沉降量总体均呈现增加趋势,同时随着水位季节性波动,地层压缩量呈现周期性变化。如分层标 F3-8 监测层位,地层岩性以粗砂和细砂为主,地层表现出弹性变形特征,呈周期性压缩回弹;其他监测层位在每一个水位变化周期内,水位回升时,土体多数情况下仍在继续压缩,但压缩速度减缓^[13]。

利用方程计算的沉降值与实测值进行对比发现,二者变化趋势基本同步,具有良好的一致性,但计算值波动较实际值偏大。为使多元回归方程更好的反应实际情况,统计计算值与实际累计沉降量之间的平均差值,对计算值进行校正优化(表 3)。比较计算值、校正值与实际累计沉降量曲线的拟合程度可以发现,后者更接近实际情况(图 4~图 7)。

表 3 各个监测层位计算值与实际值平均差值统计表

Table 3 Statistics of calculation value and actual value

监测层位	F3-3	F3-4	F3-6	F3-8
计算值 > 实际值的平均差值	2.109	2.280	1.132	0.277
计算值 < 实际值的平均差值	-2.353	-2.125	-1.265	-0.253

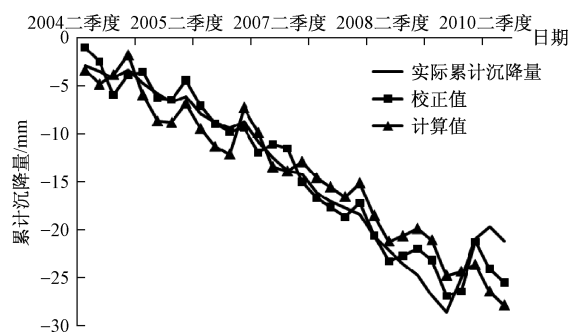


图 4 F3-3 累计沉降量实测值、计算值与校正值对比曲线

Fig. 4 Comparison of the calculation, measurement and correction value (F3-3)

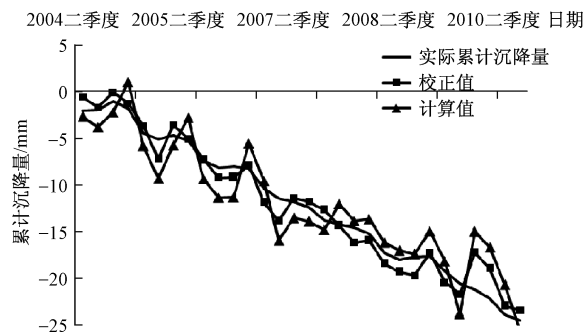


图 5 F3-4 累计沉降量实测值、计算值与校正值对比曲线

Fig. 5 Comparison of the calculation, measurement and correction value (F3-4)

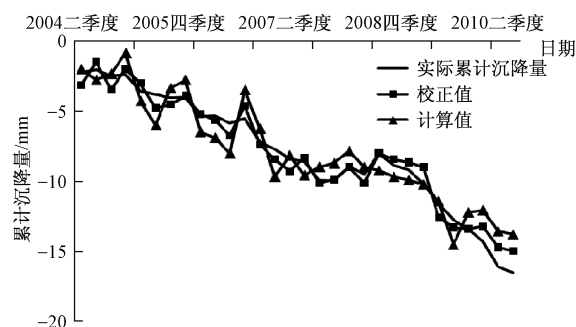


图 6 F3-6 累计沉降量实测值、计算值与校正值对比曲线

Fig. 6 Comparison of the calculation, measurement and correction value (F3-6)

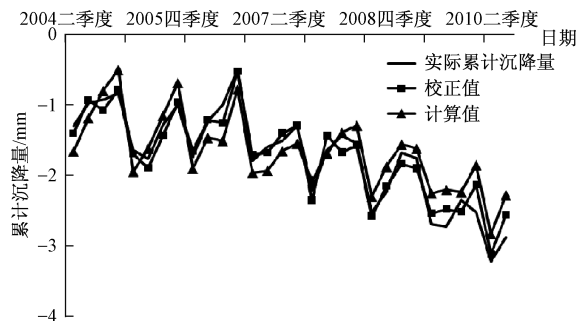


图 7 F3-8 累计沉降量实测值、计算值与校正值对比曲线

Fig. 7 Comparison of the calculation, measurement and correction value (F3-8)

3 基于不同地面沉降阈值的地下水位控制

《全国地面沉降防治规(2011—2020)》中北京市的控沉目标为:2015 年,区域地面沉降速率控制在每年 25 mm 以内,沉降中心控制在每年 45 mm 以内;2020 年,区域地面沉降速率控制在每年 15 mm 以内,沉降中心控制在每年 30 mm 以内。基于上述地面沉

降和地下水位分层监测数据的统计分析,在地面沉降现状发育基础上,确定该地区各个监测层位能够实现上述控沉目标的允许地下水位,以期为本市的地面沉降防控提供技术支持。

根据北京总体的地面沉降年度控制目标,设置该地区的地面沉降速率控制阈值为 45 mm、30 mm、

25 mm,以历史地面沉降监测数据为基础计算出各个监测层位占总沉降量的百分比,将控沉阈值按此比例分配,得到 F3-3、F3-4、F3-6 及 F3-8 的控沉目标。利用多年平均水位波动值及 2012 年水位,计算出各层位达到控沉目标时所对应的水位标高,得到实现上述地面沉降速率控制阈值的最低允许地下水位(表 4)。

表 4 不同地面沉降速率控制阈值下的各层最低允许地下水位

Table 4 The minimum permissible level of underground water in different control of settlement velocity							
监测层位	沉降速率控制阈值/mm			多年平均 水位波动 (m)	沉降速率控制阈值/mm		
	45	30	25		45	30	25
	分层控沉目标/mm				最低允许地下水位(m)		
D3-2/F3-3	3.843	2.562	2.135	0.952	-18.448	-17.716	-17.472
D3-3/F3-4	4.437	2.958	2.465	2.114	-16.806	-16.270	-16.091
D3-4/F3-6	2.705	1.803	1.503	2.081	-14.502	-14.021	-13.861
D3-5/F3-8	0.342	0.228	0.190	2.208	-10.529	-10.194	-10.082

4 结论

(1)北京平原区地面沉降与地下水位具有高度相关性。从平面上看,北京平原区地面沉降发育严重区域与平原区地下水降落漏斗分布情况基本吻合;从垂向上分析,地面沉降变化趋势与地下水水位动态变化具有良好的一致性。

(2)北京天竺地面沉降监测站内分层地面沉降与对应层位的水位标高、水位变幅及水位波动具有较好的相关关系,其中对水位标高最为敏感,而潜水水位与对应层位沉降量之间的相关性差。

(3)根据北京总体的地面沉降年度控制目标,设置该地区的地面沉降速率控制阈值为 45 mm、30 mm、25 mm,计算 D3-2、D3-3、D3-4 及 D3-5 含水层组所对应的最低允许地下水位在 -18.448 ~ -10.082 m,该结论为实现控沉目标提供了具有可操作性的地下水位控制指标,也为后期开展地面沉降防控工作提供了科学依据。

参考文献:

[1] 杨艳,贾三满,王海刚.北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析[J].上海地质,2010,31(4):23-28.
YANG Yan, JIA Sanman, WANG Haigang. The statusand development of land subsidence in Beijing plain[J]. Shanghai Geology,2010,31(4):23-28.

[2] 王家兵,王亚斌,张海涛.控制地面沉降条件下天津深层地下水资源持续利用[J].水文地质工程地质,2007,34(4):74-78.
WANG Jiabing, WANG Yabin, ZHANG Haitao. Sustainable development of the deep groundwater resources under the condition of controlling land subsidence in Tianjin[J]. Hydrogeology&Engineering Geology, 2007,34(4):74-78.

[3] 邢忠信,李和学,张熟,等.沧州市地面沉降研究及防治对策[J].地质调查与研究,2004,27(3):157-163.
XING Zhongxin, LI Hexue, ZHANG Shu, et al. Surface subsidence and its countermeasures in Cangzhou city[J]. Geological Survey and Research, 2004,27(3):157-163.

[4] 张熟,刘增寿,田小伟,等.沧州市降落漏斗、地面沉降发展演化规律及防治对策[J].工程地质学报,2005,13(S1):24-29.
ZHANG Shu,LIU Zengshou,TIAN Xiaowei,et al. The development and prevention of land subsidence、cone of depression in Cangzhou city [J]. Jurnal of Engineering Geology,2005,13(S1):24-29.

[5] 易立新,侯建伟,李子木,等.河北省廊坊市地面沉降调查[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):65-68.
YI Lixin, Hou Jianwei, LI Zimu, et al. The land subsidence survey in Langfang, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005,16(4):65-68.

[6] 易立新,侯建伟,要根明.廊坊市地面沉降灾害与城市可持续发展对策[J].工程地质学报,2005,13(S1):30-33.
YI Lixin,Hou Jianwei,YAo Genmin. Land subsidence disaster and city sustainable development in Langfang [J]. Jurnal of Engineering Geology, 2005,13(S1):30-33.

[7] 李国和,荆志东,许再良.京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J].水文地质工程地质,2008,35(6):93-98.
LI Guohe,JING Zhidong,XU Zailiang. A discussion of the correlation between land subsidence and groundwater level variation along the Jinghu high

- speed railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008,35(6):93-98.
- [8] 北京市地质矿产勘查开发局. 北京地下水[M]. 北京:中国大地出版社.
Beijing Bureau of geology and mineral exploration and Development. Beijing groundwater[M]. Beijing: China Land Press.
- [9] 杨勇,郑凡东,刘立才,等. 北京平原区地下水水位与地面沉降关系研究[J]. 工程勘察,2013(8):44-48.
YANG Yong,ZHENG Fandong,LIU Licai,et al. Study on the correlation between groundwater level and ground subsidence in Beijing plain areas [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2013(8):44-48.
- [10] 贾莹媛,黄张裕,张蒙,等. 含水组地下水位变化对地面沉降影响的多元回归分析与预测[J]. 工程勘察,2003(1):77-79.
JIA Yingyuan,HUANG Zhangyu,ZHANG Meng,et al. Application of multiple regression analysis and prediction in ground subsidence with water table[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003 (1): 77-79.
- [11] 董国凤. 地面沉降预测模型及应用研究[D]. 天津:天津大学,2006.
DONG Guofeng. Prediction model and application of land subsidence[D]. Tianjin: Tianjin University,2006.
- [12] 郝亚东,许加东,张勇. 基于多影响因子计算模型在城市地面沉降监测中的应用研究[J]. 铁道工程学报,2011(3):20-23.
HAO Yadong,XU Jiadong,ZHANG Yong. Research on application of settlement monitoring model in the calculation of multi factors based on the city ground [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011 (3): 20-23.
- [13] 田芳,郭萌,罗勇,等. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. 中国地质,2012,39(1):236-242.
TIAN Fang, GUO Meng, LUO Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing[J]. Geology in China,2012,39(1):236-242.

封面照片说明

云南省昭通市镇雄镇凤二级公路罗坎村堆积层滑坡

2014年6月,云南省昭通市镇雄县罗坎镇通往县城的镇(雄)凤(翥)二级公路罗坎村因持续降雨触发小型堆积层滑坡,滑体前缘堵塞镇凤公路达2月之久,并影响公路右侧的白水江河道。

该滑坡体长约200m,宽约150m,平均厚度约2.5m,滑体方量约 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 330° ,滑后斜坡坡度约 25° ,滑体岩性主要以片岩、板岩、页岩、泥质砂岩风化破碎的碎石土为主,属于浅表层滑动,建议进行护坡、排水、挡墙等防治工程。

(中国地质环境监测院 殷志强 供稿)