

黑方台台缘灌溉水诱发黄土滑坡群的系统分析

王家鼎, 惠泱河

(西北大学 地质系, 陕西 西安 710069)

摘要: 针对甘肃省永靖县盐锅峡、八盘峡库区的黑方台台缘灌溉水诱发黄土滑坡群的特征, 系统地分析了其形成机理、运动特征以及斜坡稳定性等方面的内容, 提出了以排水为主, 简易工程为辅的经济、合理的区域防治原则。

关键词: 灌溉; 黄土滑坡; 形成机理

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)03-0010-03

中图分类号: P642.22

Systems Analysis on Heifangtai Loess Landslide in Crowds Induced by Irrigated Water

WANG Jia-ding, HUI Yang-he

(Geological Department, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi Province, PRC)

Abstract: A due considerations have been paid to the characteristic features and phenomena of the tremendous loess landslides in crowds induced by irrigated water. All of them occurred along Heifangtai edges of platform, Gansu province, China. Based on these features and phenomena, such as large extents, high-speed and long traveling distances, their mechanism, kinematical approach and slope stability are analyzed. The regional prevention rules are presented that to take drainage work as the dominant factor and the simple engineering prevention the second one.

Keywords: irrigation; loess landslide; formed mechanism

甘肃省永靖县盐锅峡、八盘峡库区的黑方台, 距兰州市约 40 km, 属黄河 4 级阶地, 台面高在海拔 1700 m 以上, 总面积 13.44 km²。该地区是刘家峡、盐锅峡库区移民安置区之一。自 1968 年人工提取黄河水源进行大规模的农田灌溉以来, 虽然农业生产产量有所提高, 但同时造成台面大面积强烈湿陷, 水利设施普遍破坏, 台缘大规模的滑坡接连不断, 形成密集的滑坡群。

有关黄土滑坡的机理、稳定性评价及防治措施等理论, 国内外学者已作深入研究。但对严重而密集的滑坡群及其与灌溉水的关系研究并不多见。本文拟以盐锅峡、八盘峡库区黄土滑坡群为例, 系统分析其机理、稳定性评价及防治对策。

1 黑方台台缘灌溉水诱发黄土滑坡群的危害与特征

1.1 黄土滑坡群的危害

该区 1968—1983 年间的 15 a 中, 发生滑坡 15 次, 年平均 1 次, 规模较小, 滑距一般为 20~50 m; 1984—1989 年间的 6 a 中发生 9 次, 年均 1.5 次, 规

模较大, 滑距较远, 达 50~100 m; 1990—1995 年间的 5 a 中发生 22 次, 年均 4.4 次, 规模更大, 滑距更远, 达 250~400 m; 1996 年 1—3 月就发生了 3 次, 1997—1998 年发生了 6 次, 滑距达 300~400 m。

在黑方台 10 km 的台缘地带分布有大小、新老滑坡 50 多个, 它们新老迭置, 彼此相连, 构成台缘滑坡发育群带自然风景线(图 1), 尤以焦家河湾地段滑坡最为密集, 类型最为齐全。由于其滑距远, 速度高, 前次滑坡形成的高陡后壁不稳定, 短期内后壁将会再次产生滑动, 因而该段滑坡左右镶嵌, 大小相套, 以致滑坡个体难以区分, 故以“滑坡群”称之。焦家崖头段 200 m 范围内, 1984, 1989, 1993, 1994 年和 1997 年先后发生了 5 次大规模的高速远程黄土滑坡。

这种由湿陷裂缝→蠕动→轻微液化→滑动→严重液化→剧滑→泥流的黄土滑坡类型, 在黄土高原上具有普遍性。仅 10 km 长的黑方台台缘就发生这样的滑坡 50 次, 造成了极大的损失。如 1986 年 7 月 20 日庄子村后高速黄土滑坡, 体积约为 1.3×10⁵ m³, 毁坏上水管道, 威胁泵房安全, 后来不得不改移管道位置。1996 年 3 月 4 日庄子村后再次发生规模

更大的滑坡,体积 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$, 伤亡 3 人。1989 年 4 月 7 日加油站后缘发生约 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的黄土滑坡, 严重地威胁加油站的安全, 1994 年 8 月 29 日, 加油站再次发生规模更大的黄土滑坡, 体积约 $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3$, 摧毁房屋 10 余间……。据不完全统计, 仅 1992—1995 年间, 滑坡造成 5 人死亡, 4 人重伤, 10 人轻伤, 直接经济损失 1.50×10^7 元, 迫使 109 户搬迁, 损失农田 90 hm^2 。堵塞公路达 15 d, 毁坏水利设施、果木等。合计上亿元损失。另外, 黑方台台原的总面积在近 20 a 间由于滑坡的发生损失掉 0.8 km^2 。

1.2 灌溉诱发黄土滑坡群的特征

(1) 滑坡呈群体分布。前已叙及, 在一个小流域内, 由于有相同的滑坡结构, 并在同一外力的作用下, 往往暴发一系列滑坡。在黑方台, 这种滑坡群体性表现得尤为突出。

(2) 大多数滑坡的后缘裂缝都是台面上的大面积黄土湿陷坑的边缘, 这种边缘是以深、宽湿陷裂缝表现出来的, 裂缝深 $15 \sim 20 \text{ m}$, 宽 $0.4 \sim 1.6 \text{ m}$, 多有下错。滑坡的滑面往往是由这种湿陷的深、大裂缝发展而来。

(3) 滑坡剪出口的位置较高, 是形成高速、远程滑坡的根本原因。

(4) 滑面后部由湿陷裂缝发展而来, 中前部往往是黄土与红黏土层的接触面, 黏土层倾向与坡向一致, 倾角 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。

(5) 整个发育过程与湿陷、液化密切相关。

2 黄土滑坡群的机理

2.1 饱和黄土层的形成

黑方台是多年的老灌区, 并以大水漫灌的方式在台原面上灌溉, 水沿黄土的大孔隙、裂隙、垂直节理和落水洞垂直入渗, 入渗到红黏土层(隔水层)以上的黄土孔隙中滞留下来, 形成饱和层。许多研究已表明, 水在黄土中的垂直渗透速率大于水平渗透速率。然而在黑方台这种特殊的环境里, 却不尽然。为了探明区内水体的运移方式, 曾在台面中部布设了 3 个 20 m 深的人工竖井。经测试, 随着土体的埋深加大, 土体的渗透系数在逐渐减小。土体的有效渗透系数与深度有如下的统计关系

$$H = 19.95 - 2.63K \quad (1)$$

其中

$$K = \sqrt{K_v^2 + K_h^2} \quad (2)$$

式中: H ——土体埋深(m); K ——土体的有效渗透系数(10^{-4} cm/s); K_v, K_h ——分别为黄土的垂直渗透系数和水平渗透系数。其相关系数为 0.99。

式(1)适用于黄土埋深 19 m 。土体垂直渗透系数 K_v 与水平渗透系数 K_h 的比率 K_v/K_h 与深度的统计关系如下:

$$H = 13.96 - 2.46K_v/K_h \quad (3)$$

如果令 $K_v/K_h = 1$, 则临界深度 $H_T = 11.50 \text{ m}$ 。

在黑方台台面中部的深井中, 约在 11.50 m 以下, 黄土体的水平渗透系数大于垂直渗透系数。其原因是在 11.50 m 向下黄土体的含水量急剧增高、饱和度加大, 在 11.50 m 处已达 70% , 至 19.0 m 地下水水位处已达 100% 。而黄土层的下部不透水层的红黏土层又倾向黄河的一侧与坡向一致, 倾角 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。地下水向坡体径流、排泄, 从而引起黄土在 11.5 m 以下的水平渗透系数大于垂直渗透系数。黑方台灌区面积 F 为 13.44 km^2 , 年平均灌溉量 X_1 为 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 63 眼泉年出水量 Y_1 为 $4.7 \times 10^5 \text{ m}^3$, 本区年降水量 P 为 316 mm , 建立闭合区水均衡方程式求得滞留在黄土中的水量 ΔY (1 a 内) 为 $8.65 \times 10^6 \text{ m}^3$, 再计算地下水位年平均上升速度 v 为:

$$v = \frac{\Delta Y}{F} = \frac{8.65 \times 10^6 \text{ m}^3}{13.44 \times 10^6 \text{ m}^2} = 0.64 \text{ m}$$

由此可看出, 黑方台地下水位每年以 0.64 m 的速度上升, 饱和黄土层逐年加厚。

2.2 灌溉水诱发高速黄土滑坡的形成机理

图 1 是 1989 年 3 月 15 日在黑方台焦家头发生的高速远程滑坡, 滑体堵塞公路, 冲入黄河, 引起巨大的涌浪, 毁坏对岸良田 1.6 hm^2 。

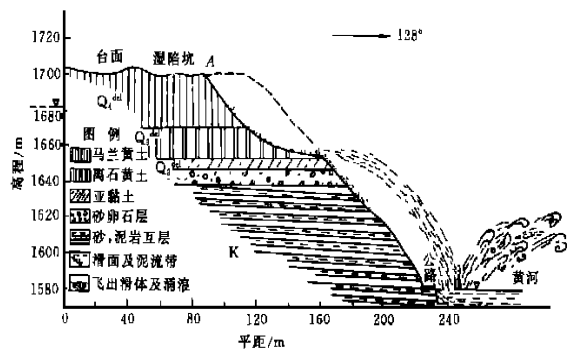


图 1 黑方台焦家崖头滑坡剖面

黑方台的黄土滑坡结构自上而下的地层依次是 Q_4 黄土、 Q_3 黄土、 Q_2 黄土上部、红黏土层、砂、砾石层及白垩系砂泥岩互层。而泥岩的倾向往往与坡向一致, 倾角 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。灌溉水沿黄土垂直节理或落水洞灌入, 在红黏土层(隔水层)以上形成一饱和层。这个饱和黄土(具架空结构)层在地球脉动及其它影响因素的作用下发生自重湿陷, 在地表形成弧形沉陷裂缝, 该裂缝逐步发展为上部滑面。滑面的逐渐形成和饱水层的长期滞留, 使黄土的黏结力 C , 内摩擦角 φ

值降低,从而也降低了黄土的抗剪强度 τ 值,其结果会使高陡斜坡体在重力作用下产生蠕动变形。饱和土层在外动力作用之前,土骨架没有产生滑移,外界重力全部由土骨架来承担,一旦蠕动产生剪切力作用,土颗粒就会产生滑移,改变排列状态,产生孔隙水压力,导致有效应力降低,产生轻微液化。轻微液化的结果加速了滑坡体变形的发展产生滑动。随着滑动速度的提高,产生的孔隙水压力不断增加,有效应力不断降低,这种状况持续发展,循环往复,直至有效应力消失,总应力等于孔隙水压力,饱和黄土完全液化。此时不但外力全部由孔隙水来承担,而且土粒本身的重量也施加于孔隙水上,产生液化物质。这种物质接近液体,不能承受任何剪切力,而只依靠非常微弱的黏滞力起阻碍作用,这时便会发生高速滑坡。接着便有残留于滑床上的液化物质在高速滑体的带动下产生黄土泥流,最后滑坡终止。

由于饱和土层在没有外力的作用下仅降低黄土的 C, φ 值,因此可从库仑定律中 C, φ 值的变化分析土抗剪强度 τ 值降低的原因。

饱和土层在外界力的作用下,往往产生液化作用,可从库仑定律中的 $(\sigma - u)$ 的变化来分析 τ 值降低的原因 (σ —— 总应力, u —— 孔隙水压力)。这两种现象都是导致高速滑坡的原因。

2.3 灌溉诱发高速黄土滑坡的运动学机理研究

黄土滑坡蠕、滑动液化机理就是剩余孔隙水压力的产生、发展和消亡的全过程总概括。所以在此推导滑坡运动轨迹方程和速度时,考虑孔隙水压力 u 。如图 2 所示,建立能量守恒关系:

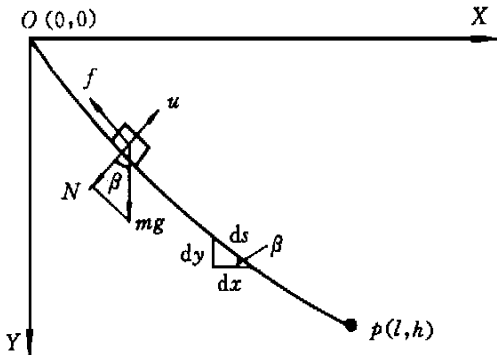


图 2 能量守恒关系曲线

$$d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = mg \cdot \sin\beta \cdot ds - (mg\cos\beta - u)\text{tg}\varphi \cdot ds \quad (4)$$

式中: u —— 孔隙水压力, $\text{tg}\varphi = \mu$ 为动摩擦系数。

关于孔隙水压力的求取,国内外学者在室内试验的基础上,提出了很多种方法,如 M · L · Silver (1977)、M · A · Sgherif (1978)、石原研尔 (1977) 和 H.

B. Seed (1976) 等。Sassa (1988) 在室内土工试验的基础上提出了如下公式

$$\Delta u = B_D (\Delta\sigma - A_D \Delta\tau) \quad (5)$$

式中: Δu —— 孔压增量; $\Delta\sigma$ —— 正应力增量; $\Delta\tau$ —— 剪应力增量; A_D, B_D —— 剪切状态下的孔压参数。

B_D 在三轴或直剪仪试验中可求得,与土的饱和度以及孔隙比有关,数值范围在 0 ~ 1 之间。 B_D 与饱和度的经验关系曲线如图 3 所示。 A_D 取决于剪切过程中土的膨胀情况,它不是一个常量,它与土壤的孔隙比 e 的经验关系曲线如图 4 所示(样品为中国黄土)。

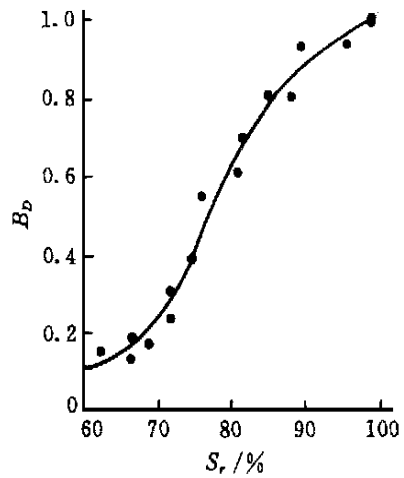


图 3 孔压参数 B_D 与饱和度 S_r 关系曲线

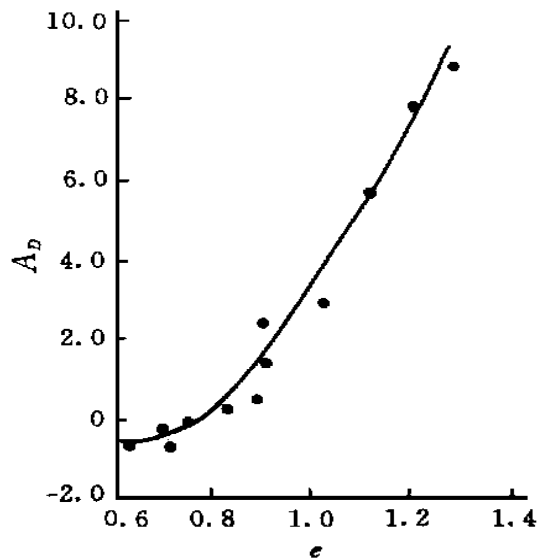


图 4 孔压参数 A_D 与孔隙比 e 关系曲线

由式(5)可推论出:

$$u = B_D (mg\cos\beta - A_D mg\sin\beta) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)整理并积分得

$$v = \sqrt{2g[(1 + A_D B_D \cdot \mu)y - (1 - B_D)\mu x]} \quad (7)$$

即:

$$\frac{dx}{dt} \sqrt{(1+y)^2} = \sqrt{2g[1 - A_D B_D \cdot \mu)y - (1 - B_D)\mu x]} \quad (8)$$

积分并按伽辽金求泛函得滑速一级近似解为:

$$V_1(x) = \sqrt{2g \left[\frac{hx}{l^2} (2l-x) - \frac{(1-B_D)\mu}{1-A_D B_D \mu} \right]} \quad (9)$$

若滑坡终止,则 $V_1(x) = 0$, $x = l$, 推导出滑距

$$l = \frac{h(1 - A_D B_D \mu)}{(1 - B_D)\mu} \quad (10)$$

笔者曾利用式(9),(10)对一系列滑坡进行过检验,结果与实际情况相符。

2.4 黑方台焦家崖头黄土斜坡稳定性分析

由于黑方台台缘在灌溉水的作用下发生一系列的滑坡,滑后的后壁斜坡大多数又再次发生次生滑坡,如焦家崖头自 1989—1997 年连续发生 5 次滑坡,使斜坡向台面中部逼近 50 m。据现场调查,未发生的次生滑坡的斜坡大多数也处于不稳定状态,后缘裂缝带密集,有的斜坡已处于蠕、滑动状态。根据极限平衡理论法和模糊信息法计算 8 处典型斜坡稳定性系数在 0.87~1.04 之间,与宏观分析一致。由此可见,黑方台台缘斜坡目前基本上处于不稳定状态或性分析极限平衡状态,采取积极的防治措施,势在必行。

3 黄土滑坡的防治措施

由于黄土地区滑坡的广泛性和严重性,区域滑坡防治应贯彻以防为主的原则,只有对预防不及并可能造成重大社会经济和环境影响的危险滑坡,才必须采取整治措施。滑坡的防治措施,一是要根据滑坡的性质而定;二是要根据财力、物力及滑坡的所处区位而定。如果滑坡处在重要的交通要道、城市居民区、工厂等,则要采取重大的工程防治措施;如果滑坡处在偏远的山区,居民点稀疏,则可适当采取一些简单的防治措施。

黑方台黄土滑坡群属蠕、滑动液化型滑坡,互连成片。该地居民点较少,仅是一些村庄。从经济角度考虑不宜采取大型工程治理措施,以疏通水为防,以搬迁为避,以简单工程措施为治。为此提出以下防治措施。

3.1 疏通地下水措施

3.1.1 改变灌溉方式、减少水体入渗量 受经济条件的限制,目前农田灌溉多采用大水漫灌的方式,结果使大量水体长期下渗,并形成地下水导致黄土体湿陷、液化,最终产生滑坡。先进的喷灌等技术相对可

节水 30%~50%,使粮食产量提高 20%,同时使水体难以入渗至深部形成地下水,而诱发滑坡。因此,逐步大力推广喷灌,是减少和防治台塬灌区蠕、滑动液化型滑坡的最有效措施,其经济效益和环境效益是非常显著的。

3.1.2 集水井 由于大水漫灌,致使大量的水体渗入地下,在红黏土层以上形成巨厚的饱和土层,为降低地下水位防止滑坡产生,可在台塬面上挖一系列的集水井,该井可汇集其周围的水量,灌溉时节可直接抽取灌溉,使地下水反复利用,形成良性循环,既节约从黄河抽水的高昂费用,又减少了地下水量,防止更大灾害发生,经济、社会效益明显。

3.1.3 渗水竖井 由于滑坡体处在 4 级阶地上,黄土层以下为第四系红黏土层、砂、砾石层、白垩系页岩等。现设想,若能将红黏土层(倾角 $5^\circ \sim 15^\circ$, 倾向与坡向一致)穿透,让水渗入砂、砾石层中,即可疏通出水。根据经济情况,在台缘每隔 30~50 m 打一个渗水竖井,并穿透红黏土层,一般深为 35~55 m 不等,井中填入渗透物质,如粗砂、砾石等。

3.1.4 平孔排水 利用机械向砂、砾石层中钻一平孔,使地下水沿此平孔排出。有时是将平孔打入滑体内,但黄土中水的渗透性远不如砂、砾石层。所以平孔排水与渗水竖井相结合是防治蠕、滑动液化型滑坡的良好途径。平孔成孔后一般在孔内放置外壁包有滤网的金属或硬质塑料花管,以延长平孔的使用时间。平孔排水与盲洞一样,是排除滑体和滑带水的主要手段,由于平孔排水具有施工简单(使用机械)、耗资少(甚造价至多只有排水盲洞的 1/5),便于根据情况调整方案等明显优越性。

3.2 建立滑坡监测系统,做好滑前搬迁工作

鉴于黑方台一带滑坡灾害频繁发生,险情较多且难于治理的状况,当地政府应在滑坡专业单位的帮助和配合下,建立较为固定的滑坡监测和管理机构,对 10 km 长的黑方台缘潜在滑坡进行长期监测,其监测的重点应放在常发生滑坡的黄茨——焦家地段。一旦发生滑坡险情,及时组织群众搬迁,撤离危险区。

3.3 简易工程治理措施

焦家崖头为黑方台斜坡的交通咽喉地段,有必要进行一些简易的工程治理措施。其主要措施为消坡减重。

[参 考 文 献]

- [1] Mostyn G R, Small J C. Method of stability analysis. Soil Slope Instability and Stabilization[M]. Walker and Fell (eds), 1987. Balkema, Rotterdam. 71—120.

(下转第 51 页)

- ed macropore systems during saturated flow [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1244—1248.
- [14] Freeze R A. A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media [J]. *Water Resour. Res.*, 1975, 11: 725—741.
- [15] Journel A G. The log-normal approach to predicting the local distribution of selective mining unit grades [J]. *Math. Geol.*, 1980, 12: 283—301.
- [16] Rawls W J, Brakensiek D L, Logsdon S D. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 1193—1197.
- [17] Rubin Y, Gomez-Hernandez J J. A stochastic approach to the problem of upscaling of conductivity in disordered media: theory and unconditional numerical simulations. *Water Resour. Res.*, 1990, 26: 691—701.
- [18] Russo D. Upscaling of hydraulic conductivity in partially saturated heterogeneous porous formation [J]. *Water Resour. Res.*, 1992, 28: 397—409.
- [19] Stalkup F I. Permeability variations observed at the faces of crossbedded sandstone outcrops [M]. in: *Reservoir Characterization*, edited by Lake L W, Carroll Jr. H B., 1986. 141—180. Academic, San Diego, Calif.
- [20] Zhang R. Estimating soil hydraulic conductivity and macroscopic capillary length from the disc infiltrometer [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1513—1521.
- [21] Federico V D, Neuman S P. Scaling of random fields by means of truncated power variograms and associated spectra. *Water Resour. Res.*, 1997, 33: 1075—1085.
- [22] Clothier B E, White I. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, 45: 241—245.
- [23] Wilson G V, Luxmoore R J. Infiltration, macroporosity, and mesoporosity distribution on two forested watershed [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1988, 52: 329—335.
- [24] Anderson J L, Bouma J. Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an Argillic horizon [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1973, 37: 408—413.

(上接第 13 页)

- [2] Michalowski R L. Slope stability analysis: a kinematical approach [J]. *Geotechnique*, 1995, 45(2): 283—293.
- [3] Schuster R L. *Landslide analysis and control* [M]. National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1978.
- [4] 张倬元, 王士天, 王兰生. *工程地质分析原理* [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [5] 王家鼎, 张倬元. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究 [M]. 成都: 四川科技出版社, 1999.
- [6] Sassa, K. Draft of theme lecture for "Motion of landslides and debris flows" [C]. Session 3A XI ICSMFE, San Francisco, 1988.
- [7] 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化 [M]. *地质论评*, 1992, 38(6): 532—538.
- [8] Wang Jiading. The analysis of loess slope instability based on fuzzy information method [J]. *BUSEFAL*, 1993, 53: 83—92.
- [9] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究 [J]. *岩土工程学报*, 1999(6): 670—674.