

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.01.23

基于 HYDRUS 的三舟溪滑坡降雨入渗规律研究

唐 扬¹, 殷坤龙², 唐子珺³

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:以三舟溪滑坡为例,运用 HYDRUS-1D 模拟软件,对由于降雨影响造成滑坡土壤不饱和区的土壤水运动进行模拟计算,为滑坡体降雨入渗规律研究提供参考依据。将模拟计算结果与实际监测结果进行对比,发现在考虑降雨影响下,评价滑坡体降雨入渗规律采用 Hydrus-1D 是可靠的。受降雨特征和初始含水率的影响,降雨对地下水位的影响存在滞后作用,5 月 25 日和 5 月 29 日降雨期间,湿润锋到达模型底部所用的时间分别为 6 h、19.2 h。

关键词:降雨;HYDRUS;入渗;降雨入渗补给

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)01-0152-05

Research on the regulation of rain infiltration in the Sanzhouxi landslide based on HYDRUS

TANG Yang¹, YIN Kunlong², TANG Zijun³

(1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Faculty of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Previous researches have shown that the evaluation of the landslide induced by rainfall is accurate or not, depending on the ability of how to describe the process of the rainfall infiltration. The modeling calculation of the unsaturated zone in the Sanzhouxi landslide induced by the rainfall are carried out by using HYDRUS-1D. The simulation results are compared with the actual monitoring results. The results show that the evaluation of the regulation of the landslide by using Hydrus-1D is reliable. The lag time of rainfall penetration recharge to groundwater is influenced by the rainfall characteristics and the initial water contents. On May 25th and May 29th, it spent 6 h and 19.2 h respectively for the wetting front to arrive to the bottom of the model. The results of the actual case can help us grasp accurately the rainfall infiltration of the landslide. They are of great significance in the evaluation of the stability of landslides under the condition of rainfall.

Keywords: rainfall; HYDRUS; infiltration; rainfall penetration recharge

降雨是滑坡最主要的诱因之一,大部分滑坡都发生在降雨之后^[1~3]。在研究降雨对滑坡稳定性影响时,计算降雨入渗引起的滑坡暂态渗流场是一个不可回避的问题,虽然运用饱和-非饱和理论计算土体含水量及基质吸力变化的方法已经较为成熟,但

降雨的水分有多少能够进入土壤内部,又有多少能补给地下水,在计算中仍然存在较大的疑问。而已有的研究表明^[4~5],降雨诱发滑坡的关键因素是湿润锋的下移和地下水位的抬升导致滑坡体基质吸力降低,抗滑力减小,下滑力增大,直至失稳。因此,准

收稿日期: 2016-03-16; 修订日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41572292,41572289)

第一作者: 唐扬(1991-),男,博士研究生,主要从事滑坡破坏机理及稳定性研究相关工作。E-mail: tangyang.520@163.com

确把握滑坡的实际降雨入渗情况,对降雨条件下评价滑坡体稳定性有重要意义^[6]。

目前,针对降雨入渗条件下滑坡体土壤水运动的问题,部分学者^[7~8]通过室内模型试验、现场监测等方式进行研究,但室内入渗试验无法反映降雨的实际情况,而现场监测也受到滑体厚度的限制,两种方法均存在一定的缺点,但又相互补充。故将两种方法结合起来进行对比分析成为一种行之有效的研究手段之一。简文星等^[9]根据降雨特征、现场试验推导了考虑坡面倾角影响的降雨入渗模型,对比监测结果,认为建立的模型能够很好地用于黄土坡滑坡的降雨入渗分析。李洪等^[10]运用 HYDRUS 模拟软件,对由于降雨影响造成土壤不饱和和区含水量分布的变化进行模拟计算,模拟结果与实际现场的测试数据相吻合。

本文以三舟溪滑坡为例,运用 HYDRUS-1D 模拟软件,对自然条件下三舟溪滑坡土壤入渗规律进行模拟与分析。

1 三舟溪滑坡概况

1.1 地质概况

三舟溪滑坡位于重庆市万州区三州村长江左岸。滑坡平面呈“簸箕形”,剖面为“折线形”。滑坡主轴长约 260 m,宽约 520 m,厚约 16.6 m。滑坡前缘高程 160~175 m,后缘高程 230 m,现有分布面积 $13.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $247 \times 10^4 \text{ m}^3$,属土质滑坡。斜坡整体呈线形,平均坡度 15° ,局部发育陡崖。滑坡平面和地下水位监测孔布置如图 1 所示。

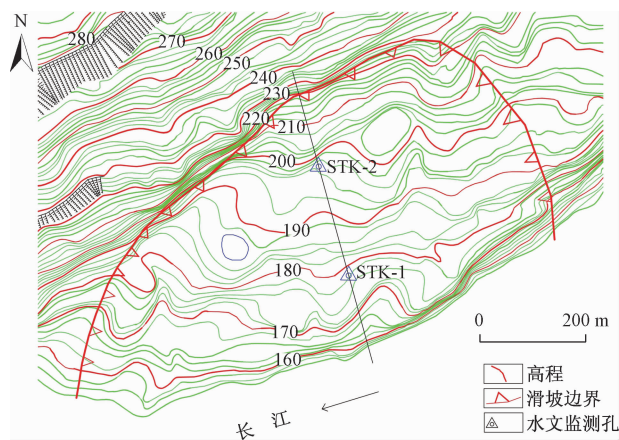


图1 三舟溪滑坡地下水位监测点布置

Fig. 1 Locations of groundwater monitoring points of the Sanzhouxixi landslide

滑体由第四系残积、坡积物堆积形成的粉质黏土夹碎块石组成。其中,土石比一般为 8:2~7:3,粉质

黏土呈黄褐色,可塑状,稍湿;碎石粒径约为 0.2~3.3 cm,含量约 10%~30%。下卧侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)砂岩、泥岩互层,岩层产状 $340^\circ \angle 3^\circ \sim 5^\circ$ 。

1.2 降雨入渗特征分析

当雨水降落在地面时会进行一次时空分配,其中一部分转化为地表径流,另一部分转化为土壤水。深入到土壤中的雨水,首先进入非饱和带,滞留在非饱和带的雨水又要进行一次分配,一部分停留在非饱和带,最终消耗于蒸散发;一部分进入饱水带补给地下水,形成地下径流,这部分补给量习惯上称为降雨入渗补给量,是造成滑坡地下水位抬升的重要组成部分,故了解地下水位的变化情况,是推求降雨入渗补给量的重要方法之一。

三舟溪滑坡上设有水文监测点 2 个(图 1),分别为 STK-1、STK-2。STK-1 号水文孔靠近长江,STK-2 号水文孔靠近滑坡后缘。STK-2 水文孔地下水位与降雨、库水位的变化关系见图 2。从图可以看出,在 2013 年 5—7 月期间,STK-2 水文孔水位短时间的剧烈变化主要由降雨引起,与库水位的变化关系较小,故 STK-2 水文孔水位变化主要受降雨影响。基于本文的研究目的,选取 STK-2 号水文孔的监测数据作为对比值。

2013 年 7 月 30 日前后,累计降雨量达到 95.1 mm,地下水位由 192.54 m 上升到 191.16 m。证明当有较大降雨情况发生时,地下水位将大幅上升。但 6 月 18—24 日期间,虽然有降雨发生,但地下水位呈现缓慢下降趋势,证明进入到滑体内的水分不一定会补给地下水,还有可能会滞留在包气带内,最终由于蒸散发作用而消散。6 月 11—18 日期间无降雨发生,地下水位呈现下降趋势。证明当地下水无补给来源时,地下水位会由于蒸散发作用而缓慢下降。总的来说,正是由于降雨影响下,滑坡地下水位才会出现短时间的大幅度波动。

此外,降雨对 STK-2 水文孔水位的影响存在一定的滞后效应。7 月 5 日降雨期间,地下水位并未有上升趋势,而是在之后的一天里才上升。已有研究表明^[11~12],降雨入渗补给地下水的滞后效应,受到地下水埋深、岩性、降水特性、土壤前期含水量等多种因素共同作用。

1.3 基于地下水动态监测的降雨入渗补给量分析

根据地下水动态长期观测资料,计算由降雨引起的地下水位上升幅度,由式(1)得单位面积降雨入渗补给量^[13]:

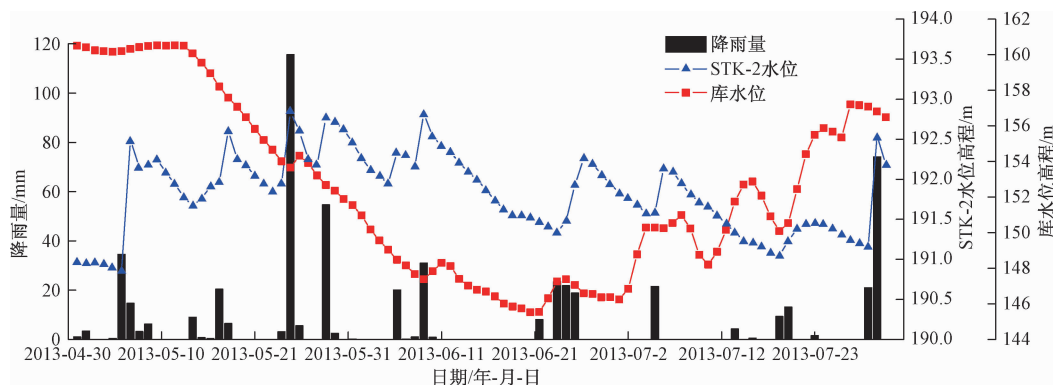


图2 2013年5月-7月三舟溪滑坡 STK-2 水文孔水位与降雨、库水位变化关系

Fig.2 Correlation analysis between groundwater level in borehole STK-2 and the rainfall, reservoir water levels from May to July in 2013

$$P_r = \mu(z) \Delta h \quad (1)$$

所以:

$$\Delta h = \frac{P_r}{\mu(z)} \quad (2)$$

式中: P_r ——单位面积降雨入渗补给量/mm;

Δh ——入渗补给引起的地下水位上升幅度/mm;

z ——随深度而变化的给水度。依据勘察报告及相关资料^[14],取给水度为 0.018。

根据式(2)求取三舟溪滑坡 2013 年 5 月期间 2 次降雨入渗引起的地下水位上升的高度。

2 基于 HYDRUS 的三舟溪滑坡降雨入渗规律

HYDRUS-1D 主要用于模拟变量饱和和多孔介质的水流和溶质运移,基于 Richards 方程对饱和-非饱和土壤水运动进行描述,采用伽辽金(Galerkin)有限元方法对方程进行数值求解,综合考虑了降雨(灌溉)、蒸散、土壤水分运移、地下水位变化等多个水循环过程,其边界条件处理灵活,是模拟自然条件下土壤水分循环的有效工具。

2.1 水分运动基本方程

仅考虑裸土情形下,同时,假设土壤为均质、各向同性的刚性多孔介质,不考虑气相及温度对水分运动的影响,则土壤垂向水分运动可用如下方程来描述:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (2)$$

式中: h ——土壤水负压/cm;

$K(h)$ ——非饱和水力传导度/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$);

$C(h)$ ——容水度/ cm^{-1} ;

z ——空间坐标/cm,向上为正;

t ——时间/d。

采用 van-Genuchten-Mualem 模型来描述土壤水分特征曲线和渗透系数曲线 $K(h)$ 。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4)$$

式中: θ_s ——土壤饱和含水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

θ_r ——土壤残余含水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

K_s ——饱和水力传导度/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$);

n ——形状参数;

l ——弯曲度参数。

2.2 模型建立

以剖面不同深度处的含水量作为土壤剖面初始含水量。模型的上边界选取考虑表层积水的“大气”边界条件,接受降雨补给和蒸发排泄。重庆市万州区 2013 年 5 月降雨量最大,为 281.4 mm,其中 25 日及 29 日两天降雨量分别为 115.6 mm、54.6 mm。基于本文的研究目标,选取这两天的降雨量进行模拟计算。土壤表面蒸发量由 HYDRUS-1D 软件自带的 Penman-Monteith 公式计算得到。

本文意在通过数值模拟研究自然降雨情形下降雨入渗补给浅层地下水的特征,从而为土壤特性和气象条件与此相近的滑坡水分循环规律提供一定的参考依据。基于此,对研究区内的浅层地下水位埋深进行概化。根据 2013 年 STK-2 水文孔地下水位资料显示三舟溪滑坡地下水位埋深平均值约为 6 m,故以 6 m 作为整个模拟时段的地下水位埋深值,探求降雨条件下包气带中土壤水分对浅层地下水的补给特征。考虑到地下水面之上毛细上升高度的影

响,张平等^[15]通过配置不同颗粒组成的土样研究了颗粒级配对毛细上升高度的影响,研究表明,当土体中小于 0.1 mm 的颗粒占 10% 且 0.25 ~ 0.5 mm 的颗粒占 90% 时,最大毛细上升高度为 45 cm,假定毛细上升高度不大于 0.5 m。故取距离地面 5.5 m 的位置作为模拟的剖面底部边界位置,并取该深度处自由排水作为土壤水流运动的下边界。这样,这里的下边界处的土壤水流量(渗漏量)可视为对地下水的“潜在”补给量^[16]。

因此,模拟剖面土壤水分运动的定解问题可表示为:

$$\begin{cases} h(z,0) = h_0, & t = 0 \\ -K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right) = q_0(0,t) - \frac{dh}{dt}, & z = 0, t > 0 \\ \left[\frac{\partial h}{\partial z}\right]_{z=-L} = 0, & t > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: h_0 ——土壤水负压在剖面上的初始值/cm;
 q_0 ——净入渗速率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),即降雨量和蒸发量之差。

滑坡土体主要由第四系残积、坡积物堆积形成的粉质黏土夹碎块石组成。根据现场和室内试验确定了土体水力参数。

表 2 土体水力参数

Table 2 Hydraulic parameters of the soil

饱和含水率 θ_s	残余含水率 θ_r	饱和水力传导度 $K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	α	n
0.41	0.02	0.63	0.075	1.89

根据三舟溪滑坡 2013 年 5 月当中的 2 次降雨特征,选取 4.8 h 作为模拟的时间步长,1 cm 作为模拟的空间步长。另外,在剖面上设置有如下观测点:一般来说,土壤深度在 2 m 以内为水量交换最为频繁的部分,在 0 ~ 2 m 每隔 0.1 m 设置一个观测点,然后在 2 ~ 4 m 每隔 0.2 m 设置一个观测点,在 4 ~ 5 m 每隔 0.5 m 设置一个观测点,最后在模型底部设置一个观测点。

2.3 模拟结果分析

降雨对地下水的垂直入渗补给可以用降雨入渗补给系数来表征其强弱,表达式为:

$$a = \frac{P_r}{P} \quad (6)$$

式中: a ——一次降雨入渗补给系数;
 P ——一次降雨过程的降雨量/mm。

将底部入渗量视为对地下水的潜在补给量,可以

得到降雨入渗补给地下水的累计入渗量,再通过式(2)计算得到降雨入渗引起的地下水位上升高度,最后,将模拟计算得到的地下水位上升高度与监测数据进行对比,其结果如表 3 所示。对比结果表明,运用 HYDRUS 计算出来的模拟值与实际监测结果相吻合,在考虑自然降雨影响下,评价滑坡体降雨入渗补给量采用 Hydrus-1D 是可靠的。

通过模拟、监测结果的比较可以认为,只要正确地把握土的非饱和渗透特性和初始的水分状态,利用 HYDRUS 可以对滑坡降雨入渗的过程进行比较符合实际情况的模拟。同时,为了更加了解滑体内水分运动状况,模拟了不同时刻下的滑体剖面含水率分布(图 3)。

表 3 实际值与模拟值的对比关系

Table 3 Different between the real value and the modelled value

时间	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	累计入渗量 模拟值 /mm	入渗引起的 地下水 抬升高度 模拟值/m	入渗引起的 地下水 抬升高度 监测值/m	降雨入 渗补给 系数
			模拟值/m	监测值/m	
5 月 25 日	4.81	27.63	1.535	1.53	0.241
5 月 29 日	2.27	9.3	0.516	0.5	0.17

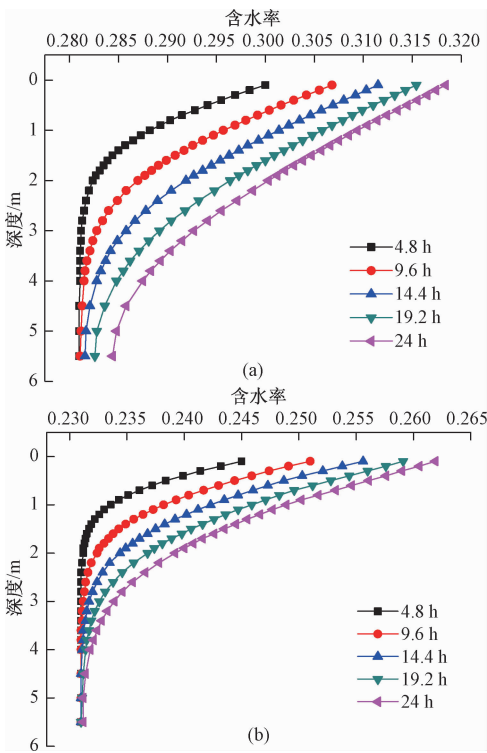


图 3 5 月 25 日 (a)、29 日 (b) 不同时刻滑体含水率剖面
Fig. 3 Water content of the soil profile on May 25th and 29th

一次特定降雨可能出现三种入渗工况^[19],工况一:降雨强度大于入渗能力,地表处于饱和状态;工况二:开始阶段,降雨强度小于入渗能力,随着降雨进行,降雨强

度大于入渗能力,地表从非饱和状态向饱和状态转化;工况三:降雨强度小于入渗能力,此时降雨全部入渗,地表处于非饱和状态。从 5 月 25 日和 5 月 29 日降雨入渗过程的地表含水率变化情况来看,降雨入渗到滑体内的过程属于第三种工况,即降雨强度小于入渗能力,降雨全部入渗,整个过程地表处于非饱和状态。

由于水分下移需要一定时间,降雨入渗补给地下水存在一定的滞后效应。模拟结果表明:5 月 25 日降雨量及初始含水率较大,湿润锋下移较快,到达模型底部所用的时间为 6 h;相比较而言,5 月 29 日降雨量及初始含水率较小,湿润锋下移较慢,到达模型底部所用时间为 19.2 h。

3 结论及建议

(1)在分析降雨入渗补给地下水特征的基础上,参考三舟溪滑坡 STK-2 水文孔地下水监测数据及本区域 2013 年的降雨资料,选取了其中降雨量较大的 2 次降雨,对滑体降雨入渗问题进行模拟。结果表明,只要正确地把握土的非饱和渗透特性和初始的水分状态,利用 HYDRUS 可以对降雨入渗过程进行比较符合实际情况的模拟。受降雨特征及初始含水率的影响,降雨对滑坡地下水的补给作用存在一定的滞后效应,5 月 25 日和 5 月 29 日降雨期间,湿润锋到达模型底部所用的时间分别为 6 h、19.2 h。

(2)降雨导致的地下水位抬升、湿润锋下移是降雨型滑坡失稳的主要机制,因此准确刻画降雨入渗过程是揭示降雨型滑坡稳定性的关键。HYDRUS 模拟软件可以对降雨入渗过程中累计入渗补给量以及土壤含水率的变化进行比较符合实际情况的模拟,从而得到地下水位的抬升值以及湿润锋的下移情况。这一实际案例的研究结果有助于准确把握实际降雨入渗情况,对降雨条件下评价滑坡体稳定性有重要意义。

(3)文章针对三舟溪滑坡降雨入渗过程的模拟进行了理想化的处理,想要更进一步揭示滑坡的降雨入渗过程,还应该结合现场试验,加强滑坡地下水及滑体含水率等的监测进一步研究。

参考文献:

[1] 张群,许强,甯娜. 降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 91 - 93. [ZHANG Q, XU Q, NING N. Secondary information fusion model of safety evaluation in the upper steep coal-goaf [J].

Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 91 - 93. (in Chinese)]

- [2] 代贞伟,李滨,陈云霞,等. 三峡大树场镇堆积层滑坡暴雨失稳机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 150 - 156. [DAI Z W, LI B, CHEN Y X, *et al.* A study of the failure mechanism of rainfall-induced accumulation landslide in the Three Gorges Reservoir region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 150 - 156. (in Chinese)]
- [3] 刘艳辉,方志伟,温铭生,等. 川东北地区强降雨诱发崩滑流灾害分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 112 - 115. [LIU Y H, FANG Z W, WEN M S, *et al.* Analysis of geo-hazards and rainfall in northeast of Sichuan Province, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 112 - 115. (in Chinese)]
- [4] 吴益平,张秋霞,唐辉明,等. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(7): 890 - 892. [WU Y P, ZHANG Q X, TANG H M, *et al.* Landslide hazard warning based on effective rainfall intensity[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(7): 890 - 892. (in Chinese)]
- [5] Gasmo J M, Rahardjo H, Leong E C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope [J]. Computers and Geotechnics, 2000, 26: 145 - 165.
- [6] RAHARDJO H, LEE T T, LEONG E C, *et al.* Response of a residual soil slope to rainfall [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 340 - 351.
- [7] 朱伟,陈学东,钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1874 - 1877. [ZHU W, CHEN X D, ZHONG X C. Observation and analysis of rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1874 - 1877. (in Chinese)]
- [8] 张常亮,李萍,李同录,等. 黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 728 - 733. [ZHANG C L, LI P, LI T L, *et al.* In-situ observation on rainfall infiltration in loess[J]. Journal of Hydraulic, 2014, 45(6): 728 - 733. (in Chinese)]
- [9] 简文星,许强,童龙云. 三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3528 - 3530. [JIAN W X, XU Q, TONG L Y. Rainfall infiltration model of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3528 - 3530. (in Chinese)]

(下转第 163 页)