

充气截排水对弃土场边坡稳定性影响的数值模拟研究

韦宏宽¹, 曾超², 夏侯云山¹, 刘晓^{1*}, 抗兴培¹, 王彪龙¹

(1.中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074;

2.中交第二公路勘察设计院有限公司)

摘要:弃土场边坡是一种内部物质结构松散的人工边坡,其地下水渗流场的变化对边坡稳定性产生显著影响。充气截排水技术是近年来涌现的一种新的土坡加固方法,尤其适用于对渗流敏感的土坡,其特征形成非饱和区截水帷幕,从而降低潜在滑坡体的地下水位,提高边坡稳定性。为研究充气截排水技术应用于弃土场边坡加固的可行性,该文以气-水两相流渗、饱和-非饱和渗流理论为依据,以 GeoStudio 软件模拟为技术手段,研究了在潜在滑坡区地下水位线以下进行充气以实现边坡加固的方法,模拟了不同充气压力、不同充气方式、以及充气前后对弃土场边坡稳定性及截排水效果的影响。结果表明:① 充气截排水法存在最佳充气气压,不同充气方式对启动气压和最佳充气气压有显著影响;② 停止充气后,渗流场的再平衡过程不可逆,表现为地下水位线回弹量有限;③ 弃土场边坡的稳定性在维持充气过程中和充气后均得到提高。综上所述,充气截排水技术在弃土场边坡加固领域具有良好的应用前景。

关键词: 充气截排水; 充气压力; 充气方式; 弃土场边坡; 数值模拟; 边坡稳定性

1 引言

边坡可分为自然边坡和人工边坡,弃土场边坡是工程建设中常见的人工边坡,此类边坡在降雨诱发下极易发生滑坡失稳。地下水渗流场状态变化主要受降雨补给入渗的影响,同时降雨量越大的地区滑坡越发育。王桂尧进行了降雨条件下的边坡渗流分析发现降雨入渗的速度与土体的渗透系数有关。滑坡体后缘斜坡区是滑坡降雨入渗的主要汇水区,滑坡体地下水位上升主要是由于滑坡后缘地下水入渗导致的。因此对边坡采取排水措施以降低地下水位是提高降雨型滑坡稳定性的重要方式之一,目前常采用的滑坡排水措施是利用水的重力势能排水原理(如排水洞、截水沟等),将高处的水往低处排,以此来减小水对边坡稳定的影响。针对具有有利地形条件的边坡,可以达到很好的排水效果,然而许多边坡往往缺乏这一有利条件,很难实现快速有效排水。因此,施工简单、快速截排水且工

程造价相对较低的排水方法,对于降雨型滑坡具有重要意义。

土的复杂系统中包括:水-气-固三相体,其中渗透性主要受土体中气-水分布的影响。非饱和土理论和土壤学理论研究表明:土的渗透性随饱和度的降低而降低,即土中的气体对土中水入渗有阻碍作用。含水层地下储气库的成功建造、垃圾填埋场中因产生气体而储量缩减、压气新奥法隧道施工、曝气法清除土壤及地下水中污染物,都说明了通过有压气体可以把土体中饱和区域变成非饱和区域。李援农等验证了土壤中的有压气体会对水流产生阻力作用;刘长殿等通过模型试验研究,非饱和土体中,气体形态随充气压力的不同而变化及充气气体的阻渗效果;杜丽丽通过物理模型试验和数值模拟分析对充气截排水法进行了较全面的研究;将渗透系数较小的粉土夹层代替非饱和土层区域通过数值模拟分析发现,截排水效果随着充气气压增大,效果越明显;截排水效果与土体渗透系数和空隙率无关;余文飞通过数值模拟分析发现,往土体中

收稿日期:2019-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41572279);中国博士后科学基金特别资助项目(编号:2014T70758);中国博士后科学基金资助项目(编号:2012M521500);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:CUGL170212)

作者简介:韦宏宽,男,硕士研究生.E-mail:h18775806741@163.com

* 通信作者:刘晓,男,博士,副研究员.E-mail:liuxiao@china.com

充气形成非饱和区过程中,土体的孔隙气压力、孔隙气流速、体积含水量和孔隙水渗流速度之间有良好的相关性;通过物理模型试验和数值模拟分析提出了对于特定坡体,存在与之对应的截排水起始充气气压和最佳充气气压;钱文见提出在坡体后缘充气时,充气点离潜在滑坡区越近,截排水效果越好,选择充气点深度时,充气点放置越深,充气效果越好。

目前,充气截排水技术已有一定的理论基础,但仍存在不足:① 大多数研究是建立在物理模拟基础上,模型相对较小,条件也比较理想,尚未针对弃土场边坡开展较为大模型的模拟;② 充气方式比较单一,仅开展以点的充气方式;③ 未涉及到充气截排水对坡体渗流场扰动是否可逆的探讨,即尚未揭示停止充气后,地下水位线是否回弹和回弹量多大的问题,而这一问题对边坡加固的实践至关重要,因为在整个工程的生命周期中,在野外长期保持空压机加气站是不现实的。

鉴于此,该文以贵州山区平(塘)罗(甸)高速公路某弃土场边坡为实例,由于弃土场边坡是由弃渣填埋形成,存在渗透性相差较大的两块区域,且弃渣与原坡面的界面将是地下水渗流的主要通道,这为该文提供了很好的研究模型。该文在前人研究基础上,通过野外勘察、室内试验获得弃土场边坡的物理力学参数,用数值模拟方法研究充气截排水法在弃土场边坡中对地下水渗流场的扰动情况,以及由此产生的边坡稳定系数变化,同时研究不同充气方式对边坡充气效果的影响。

2 土体气—水两相流理论

2.1 控制方程

土体的气—水两相流的控制方程为质量守恒方程,在多相渗流需要考虑气体的影响时,通常将空气压力近似当作大气压。然而在大多数情况下,这种假设并不能很好地反映真实情况。因此,对于多相渗流问题,在建立质量守恒方程时必须同时包含孔隙气压力和孔隙水压力。

对于二维可压缩流动,通用质量守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[-(\rho k) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[-(\rho k) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + Q \quad (1)$$

式中: k 为流体的渗透系数(m/s); θ 为流体的单位体积含量; t 为时间(s); ρ 为流体密度(kg/m³); Q 为汇源项[kg/(m³·s)]; H 为总水头(m)。

(1) 水的质量守恒

由于水不可压缩,故水的质量守恒方程可用体积守恒方程来表示:

$$m_w \gamma_w \frac{\partial H_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial H_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial H_w}{\partial y} \right) + m_w \frac{\partial p_a}{\partial t} + Q_w \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的重度(kN/m³); k_w 为渗透系数(m/s); m_w 为土水特征曲线在某一特定孔隙水压力处的斜率; H_w 为渗流过程中的总水头(m); p_a 为孔隙气压力(kPa); Q_w 为水的汇源项[kg/(m³·s)]。

(2) 气体的质量守恒

$$\left(\frac{\theta_a}{RT} + \rho_a m_w \right) \frac{\partial p_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_a \frac{k_a}{\gamma_{oa}} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{\rho_a^2 k_a}{\rho_{oa}} x \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho_a \frac{k_a}{\gamma_{oa}} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{\rho_a^2 k_a}{\rho_{oa}} y \right] + \frac{\theta_a p_a}{R} \frac{\partial (1/T)}{\partial t} + \rho_a \gamma_w m_w \frac{\partial H_w}{\partial t} \quad (3)$$

式中: ρ_a 为气体密度(kg/m³); k_a 为透气系数(m/s); T 为温度(K); ρ_{oa} 为标准状态下气体密度(kg/m³); γ_{oa} 为标准状态下气体重度(kN/m³),对于干燥空气, $R=287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.2 水土特征曲线

依据非饱和渗流理论,土体的渗透性随饱和度降低而降低。目前,主要通过土水特征曲线来描述非饱和土的渗透性与土体含水量之间的关系。利用 GeoStudio 中的 SEEP/W 和 AIR/W 模块相结合,模拟土体中气—水两相流,其中土体中水、气渗透率曲线和土体特征曲线可用 Van-Genuchten 模型来定义。

土水特征曲线为:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (4)$$

式中: θ_w 为体积含水量(m³/m³); Ψ 为基质吸力(kPa); θ_r 为残余体积含水量(m³/m³); θ_s 为饱和体积含水量(m³/m³); a, m, n 均为拟合经验参数, $n=1/(1-m)$ 。

导水率函数为:

$$k_w = k_s \frac{\{1 - a \Psi^{n-1} [1 + (a \Psi^n)^{-m}]\}^2}{[1 + a \Psi^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (5)$$

式中: k_w 为渗透系数(m/s); k_s 为饱和渗透系数(m/s)。

导气率函数为:

$$k_g = k_{dg} (1 - s_w)^{0.5} (1 - s_w^{\frac{1}{q}})^{2q} \quad (6)$$

式中: k_{dg} 为干土的透气率(m/s), $q=2.9$ 。

3 工程概况

贵州山区平罗高速公路某弃土场边坡,位于宽陡冲沟内,原冲沟两侧边坡坡角 50°左右。由岩质边坡开挖堆积而成,弃渣为松散破碎的页岩、泥岩、灰岩,并伴有大量破碎混凝土块,夹有少量泥质土。该弃土场占地面积 170 m×70 m,平均厚度 15~20 m,弃渣量体积约 18 万 m³,坡面走向 SE105°。据现场调查,弃土场所在冲沟常年有水,上游支流众多,依据地形图计算其汇水面积约为 5.17 km²,由于雨季水量较大,这将对弃土场边坡不利。根据实地勘察,利用 SLOPE/W 建立边坡稳定性分析模型(图 1),其中弃土场边坡左侧地下水位 500 m,右侧地下水位 472 m。

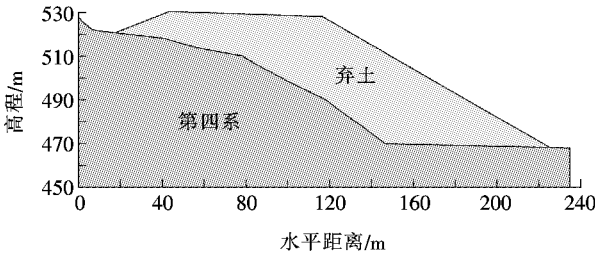


图 1 弃土场边坡模型

4 充气截排水数值模拟

利用 GeoStudio 中的 SEEP/W 和 AIR/W 模块,

建立边坡二维气—水两相模型,通过往弃土场边坡充入不同气压及改用不同充气方式进行充气截排水数值模拟研究,分析充气截排水对弃土场边坡渗流场的变化,从而研究充气截排水对边坡稳定性的影响效果。

4.1 弃土场边坡模拟模型

利用图 1 所示的边坡模型进行模拟分析。弃土场边坡水平距离 234 m,高差 34 m,坡度 28°。对于该边坡模型,先进行自然状态下渗流场分析,并将其分析结果作为初始条件,再进行充气过程的瞬态分析,模拟充气稳定后、停止充气稳定状态下坡体地下水渗流变化情况,最后分析充气截排水对边坡稳定性的影响。

4.2 边界条件

(1) 未充气时的边界条件:在弃土场边坡模型左侧和右侧分别施加地下水位为 500 m 和 472 m 的定水头边界,斜坡面为潜在渗流面。

(2) 充气时的边界条件:水相边界与未充气时边界相同,气相边界为所有坡面为透气边界。

4.3 材料参数

基于 Van—Genuchten 提出的土壤水分特征曲线,并依据现场调查,结合部分室内试验和前人在贵州山区弃土场的研究,得到岩土物理力学参数如表 1 所示,一般干土渗气系数比饱和渗水系数大 1~2 个数量级,故该文中取渗气系数为饱和渗水系数的 10 倍。

结合表 1 数据,由式(4)得到上层弃土和下层第四系岩土土—水特征曲线(图 2)。

由式(5)计算得到上层弃土和下层第四系岩土渗透函数随基质吸力的变化曲线(图 3)。

表 1 数值模拟计算参数

取样部位	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	饱和含水量/ (m ³ ·m ⁻³)	饱和渗水系 数/(m·s ⁻¹)	饱和和渗气系 数/(m·s ⁻¹)	残余含水量/ (m ³ ·m ⁻³)
弃土	25	13	25	0.425	4.80×10 ⁻⁵	4.80×10 ⁻⁴	0.040 0
第四系	22	14	23	0.385	1.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁴	0.038 5

4.4 模拟结果分析

4.4.1 点充气截排水模拟效果分析

点充气方式即气体从充气管口出来后直接与土体接触,并作用于土体(图 4)。以初始模型为基础,赋予相应的材料参数进行稳态分析,得到自然状态下的稳态渗流如图 5 所示。充气截排水技术是通过充气管向边坡土体中充气,充气管出口处于离地下水位线垂直距离 3 m 处,其平面坐标为(146.4 m,476.4 m)。在进行充气截排水模拟时发现产生的效果与充气气压大小

是否达到启动气压有关,启动气压是指刚对坡体产生作用的临界气压。考虑到启动气压与水头压力和土体孔径有关,暂定初始气压为 100 kPa,然后逐渐增大气压确定充气起始气压。结果发现充气区附近地下水位开始发生变化时,对应的充气气压为 150 kPa,继续增加充气气压,当气压达到 500 kPa 时,充气区附近能够形成最大的稳定非饱和区域。由于气体从充气管口向四周扩散需要时间,因此在充气初期影响的区域较小,待坡体渗流场稳定后,充气处的后缘地下水位被明显抬

地下水位线的向上回弹,但这种回弹并不能完全恢复到充气前的初始状态,而是存在明显的差异;在稳定系数的变化上表现为:停止充气稳定后边坡稳定系数虽发生回弹(降低),但介于初始稳定系数(低值)和充气稳定后稳定系数(高值)之间。说明充气截排水对坡体的渗流场产生不可逆的扰动,停止充气后土体中存在的封闭气体仍有一定程度的截留减渗作用,这也从岩土力学这一侧面,验证了普利高津耗散结构不可逆理论的普适性。也正是利用了这一特性,使得充气截排水可用于对渗流边坡的治理。

4.4.2 线充气截排水模拟效果分析

线充气方式与点充气方式不同在于充气管口的开口形式不同,线充气区域起始点和终点的平面坐标分别为(146.7 m,272.85 m)和(146.7 m,275.7 m),总长度 2.85 m,如图 7 所示。对于线充气方式,暂定初始充气压力为 100 kPa,然后逐渐增大气压确定充气起始气压。结果发现充气区附近地下水位开始发生变化时,对应的充气气压为 120 kPa,继续增加充气压力,当气压达到 470 kPa 时,充气区附近能够形成最大的稳定非饱和区域,坡体前缘地下水位明显降低,如图 8 所示。

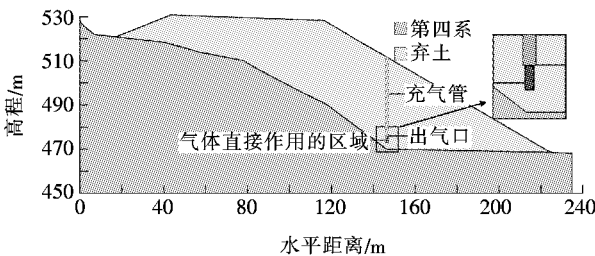


图 7 线充气边坡模型

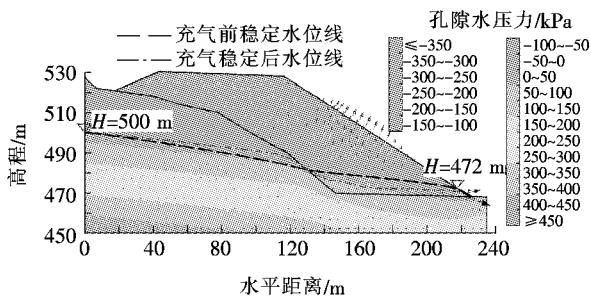


图 8 线充气稳定后坡体气-水流动情况(470 kPa)

在初始气压为 100 kPa 的基础上,通过逐渐增大气压来观察充气截排水的效果,当气压变化为 120~470 kPa 时,充气截排水的效果较好。当气压为 520 kPa 时,发现充气截排水的效果没有 470 kPa 时明显,这说明 470 kPa 可能是线充气方式的最佳气压。

基于线充气方式,在不同气压条件下边坡稳定性系数如表 3 所示。

表 3 线充气气压变化对应的边坡稳定性系数

P / kPa	充气稳定后 f_{os}	停止充气稳定后 f_{os}	重新平衡时间/d
0	1.032	—	—
120	1.033	1.032	9
170	1.036	1.034	9
220	1.037	1.035	10
270	1.040	1.036	11
320	1.041	1.038	10
370	1.042	1.039	10
420	1.043	1.040	11
470	1.044	1.041	11
520	1.042	—	—

对比表 2、3 的结果可以发现:① 对于线充气方式,在充气压力为 120~470 kPa 范围内,边坡稳定系数逐渐增加,当充气压力大于 470 kPa 时,稳定系数存在减小趋势。表明边坡稳定系数随充气压力变化规律与点充气方式基本一致,在最佳充气气压范围内,均随着充气压力的增加而增大,然而超过最佳气压,稳定系数有所减小。同时,停止充气后,坡体的渗流场也产生不可逆的扰动,这一效果与点充气方式类似;② 充气截排水法的启动气压大小受充气方式影响,即以线的方式充气的启动气压小于以点的方式充气;充气截排水法对坡体充气过程中存在最佳充气压力值,且线的充气方式的最佳充气值小于点的充气压力值。

不同气压下边坡稳定系数变化如图 9 所示。

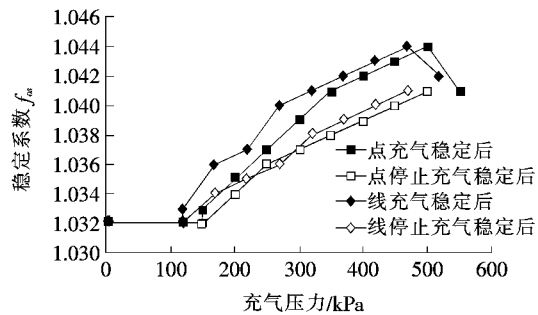


图 9 不同气压下边坡稳定系数的变化

由图 9 可知:为达到相同的稳定系数,相对于点充气方式,线充气方式需要的气压值较小。综合说明当以线的方式充气时,产生的效果较好,时间较短,这在滑坡治理工程的实施中可以争取宝贵的时间。

5 结论

以非饱和渗流为理论基础,采用 GeoStudio 软件对弃土场边坡进行数值模拟,研究弃土场边坡在不同充气值及不同充气方式条件下对边坡稳定性的影响以及充气截排水法在弃土场边坡中对地下水渗流场的扰动情况,得出如下结论:

(1) 分析结果表明:在边坡地下水位以下充气形成的非饱和区截水帷幕可阻止或减少后缘水的入渗,从而降低边坡前缘的地下水位。

(2) 在地下水位线以下充气,充气排水过程存在启动气压;且充气方式不同,启动气压也不同。

(3) 在不同充气值条件下,边坡稳定系数随气压大小变化而变化,在一定气压范围内气压越大,边坡稳定系数越大;当气压超过一定值时,边坡稳定性降低。

(4) 停止充气后稳定状态下,边坡中孔隙压力减小,原被挤压未排出的水回流,地下水位线相对于充气稳定后上升,说明停止充气后地下水位线产生回弹。

(5) 停止充气后稳定状态下,边坡稳定系数介于初始稳定系数(低值)和充气稳定后稳定系数(高值)之间,说明停止充气后土体中存在的封闭气体仍有一定程度的截留减渗作用,充气截排水对边坡渗流场的扰动是不可逆的。

参考文献:

- [1] 谭超.地下水对滑坡的力学作用研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2009.
- [2] 王桂尧,付强,吴胜军.降雨条件下路基边坡渗流分析[J].中外公路,2010(5).
- [3] 李援农.土壤入渗中气相对水流运动影响的研究[J].干旱地区农业研究,2002(1).
- [4] 李援农,林性粹.均质土壤积水入渗的气阻变化规律及其影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997(3).
- [5] 张华,吴争光.封闭气泡对一维积水入渗影响的试验研究[J].岩土力学,2009(S2).
- [6] 孙冬梅,冯平,张明进.考虑气相作用的降雨入渗对非饱和土坡稳定性的影响[J].天津大学学报,2009(9).
- [7] 叶为民,王初生,王琼,等.非饱和粘性土中气体渗透特征[J].工程地质学报,2009(2).
- [8] OSAMA K N, LAITH M R. Soil Air Permeability and Carbon Dioxide flux Measurements from the Soil Surface[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(9/10): 1 406—1 415.
- [9] 展长虹,焦文玲,廉乐明,等.利用含水层建造地下储气库[J].天然气工业,2001(4).
- [10] 陈云敏,谢焰,詹良通.城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型[J].岩土工程学报,2006(2).
- [11] 李仲奎,高翔,杜若超.压气新奥法隧洞施工技术及其在城市地下工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,1995(1).
- [12] 刘辉,李仲奎,廖宜,等.压气新奥法隧道施工中的渗流分析[J].岩石力学与工程学报,2006(3).
- [13] 张英.地下水曝气过程中气体流型的实验研究[C].中国化工学会第二届全国传递过程学术研讨会论文集,2003.
- [14] 刘长殿.边坡充气截水技术的模型试验研究[D].浙江大学硕士学位论文,2013.
- [15] 杜丽丽,孙红月,尚岳全,等.滑坡应急治理充气截水方法[J].岩石力学与工程学报,2013(S2).
- [16] 杜丽丽,孙红月,尚岳全,等.充气截排水滑坡治理数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2014(S1).
- [17] 杜丽丽.滑坡治理的充气截排水方法研究[D].浙江大学博士学位论文,2014.
- [18] 余文飞.边坡充气截排水作用机理模拟研究[D].浙江大学硕士学位论文,2017.
- [19] 余文飞,孙红月,沈佳轶,等.降低滑坡地下水位的充气截排水法最佳充气压力研究[J].岩石力学与工程学报,2017(4).
- [20] 余文飞,孙红月,尚岳全,等.坡体充气过程中气水两相流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2016(S2).
- [21] 钱文见.边坡充气渗流特征及截排水影响因素模拟研究[D].浙江大学硕士学位论文,2016.
- [22] 钱文见,尚岳全,杜丽丽,等.充气位置及压力对边坡截排水效果的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2016(2).
- [23] Geo—Slope International Ltd.. Air Flow modeling with AIR/W2007[M]. Cannada, 2008: 117—120.
- [24] 李援农,刘书榜.土壤入渗气液两相流的变化过程[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2002(6).
- [25] Air Entrapment Effects on Infiltration Rate and Flow Instability[J]. Water Resources Research, 1998, 34(2).
- [26] Van Genuchten MT. A Closed—Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892—898.
- [27] 谭鹏.山区高速公路弃土场基本特性及其稳定性分析[D].重庆交通大学硕士学位论文,2010.
- [28] 王初生.气体在饱和粘性土中渗透行为的模拟试验及其工程应用[D].同济大学博士学位论文,2006.
- [29] 普利高津·Y.,等.确定性的终结[M].上海:上海科技教育出版社,1998.