

不沉的“舰队” 永远的雅丹

——敦煌世界地质公园之雅丹地貌

□ 文图 / 王彦洁 武法东 韩晋芳 蔡胤璐 郝丹萌 金淑婷



＞“舰队出海”——垄岗状雅丹

第一作者简介 王彦洁，博士，讲师，硕士生导师，主要从事地质遗迹保护、地质公园建设、旅游地理等方面的教学与研究工作。

通信作者简介 武法东，教授，博士生导师，国家地质公园专家数据库成员；主要从事第四纪地质学、沉积学、地质遗迹保护及地质公园建设方面的教学与研究工作；发表各类文章 100 余篇，出版地质公园 / 地质遗迹相关研究专著、科普画册及读物 20 余部（本）。

敦煌联合国教科文组织世界地质公园（以下简称“敦煌世界地质公园”）位于甘肃省敦煌市，由雅丹景区、鸣沙山月牙泉景区，以及自然景观游览区和文化遗址游览区组成，面积 2 067.2 平方千米。特殊的地质背景和极端干旱的气候条件形成的

地貌景观，与特殊的地理位置和古丝绸之路形成的文化遗址在这里融为一体。令人称奇的雅丹地貌、山泉相映的鸣沙山月牙泉，以及广袤壮阔的沙漠、戈壁和西湖湿地是大自然的造化；举世闻名的莫高窟、古丝绸之路文化遗址阳关、玉门关，以及古军

事遗址汉长城、河仓城等，则是敦煌历史文化的写照。雅丹景区位于地质公园西端，东距玉门关约 60 千米，距敦煌市区约 160 千米，面积 346.35 平方千米。主要景观为规模宏大、气势磅礴的大型垄岗状、墙状、塔状和柱状雅丹地貌，它们拟人似物，栩栩如生，造就了我西部名副其实的“魔鬼城”，与浩瀚无垠的戈壁、沙漠景观相辅相成、浑然一体。

什么是雅丹？“雅丹”一词源于中国罗布泊地区，是维吾尔语的音译，意为具有陡壁的土丘。19 世纪末 20 世纪初，一些中外学者到罗布泊地区考察，发现了这种大面积分布的土丘和沟谷相间的地貌。瑞典地理学家、探险家斯文·赫定在他的著作《中亚和西藏》

（Central Asia and Tibet）中将其命名为“Yardang”，我国学者译为“雅丹”，是指干旱、半干旱地区一种以风蚀作用为主形成的地貌，分布于除澳洲外各大洲的荒漠或海岸地带。此后，国内外学者对雅丹地貌的定义、类型、形态特征、发育过程、形成年代及美学价值等方面进行了研究。敦煌世界地质公园中的雅丹地貌是我国乃至世界雅丹地貌的典型代表，它的形成是地球内、外动力共同作用的结果，了解它的过往，会更加深入自然，了解地质与地貌演化。

天造地景 神奇魅影

敦煌雅丹地貌在区域上分为北区和南区两个明显不同的部分，整体走向差异显著。在北区，雅丹地貌为南北方向延伸，而南区的雅丹地貌则近东西向延伸。雅丹体一般高 5~35 米不等，最高者可达 60 米；长度变化比较大，从几米到几百米不等，最长者延伸超过 1 000 米。雅丹体形态特征和分布密度差异也很大，单体之间分布有风蚀作用形成的戈壁和风积作用形成的沙垄。

雅丹地貌的形态变化与其物质组成密切相关。雅丹地貌的地层由黏土、泥质、砂质和粉砂质沉积物互层构成，偶夹砂砾薄层。一般而言，地层中河流相成因的砂质层较松散，容易被风化、侵蚀而形成内凹状，而湖泊相成因的泥质、黏土质层抗风化能力强，多以突起的形态为主。雅丹体具有奇、险、幽、古、魅的特点，如舰队出海，似神秘城堡，千奇百态，惟妙惟肖，所以这里又称为“魔鬼城”。根据雅丹体的形态和规模，可将它们划分为垄岗状、墙状、塔状、柱状和残丘状几种类型。

雅丹景区南北两端各发育一条东西走向的断层，雅丹地貌基本分布于两断层之间。在空间上，雅丹地貌的发育和分布与三级河流阶地密切相关，表现为地貌是受阶地控制的三个不同的高度。野外调查并测量三级阶地高程，发

现阶地的高度与一定范围内雅丹体顶的高度大致相当。其中，与一级阶地高度相当的雅丹体分布最广、类型最全；与二级阶地基本等高的雅丹体发育程度较差，多被破坏，保留下来的仅为阶地附近的以壮年期为主的雅丹体；与三级阶地高度基本持平的雅丹体则很少见，基本已被侵蚀殆尽。

数十万载 自然孕育

运用“将今论古”的地质学思维方法，对雅丹地貌中典型的地层剖面进行大量测量和系统取样，通过详细的沉积学分析认为，组成雅丹地貌的地层是还未成岩的松散沉积物，这些沉积物由搬运距离不远的河流带来，主要是砂质和砾质。此外，也有距离物源区不远的湖泊相泥质、



“城门”——塔状雅丹

黏土质沉积物。中粗粒砂质沉积层中的大型交错层理、冲刷面及其上的泥砾层等反映沉积环境的多种标志，均表明了较强的河流作用；泥质、黏土质沉积层横向稳定，层面上发育的波痕和泥裂等，表明湖泊分布范围相对较大，且湖泊水体较浅。地层中沉积物的测年结果显示，地层剖面底部较老地层沉积物的年龄距今约（ 30.60 ± 3.0 ）万年，顶

部较新地层沉积物年龄距今约（ 13.14 ± 1.30 ）万年，这表明构成雅丹地貌的沉积物形成于中更新世中晚期。

通过对雅丹地貌各种特征考察分析，综合考虑影响雅丹地貌形成的动力学因素，敦煌雅丹地貌的形成和发育过程可以划分为孕育期、幼年期、青年期、壮年期、老年期和消亡期六个阶段，各阶段相应的典型雅丹体类型在研究区范围内清晰可见。

地球动力 生死轮回

内动力控制作用

内动力地质作用对敦煌雅丹地貌的控制作用通过新构造运动反映出来，表现在两个方面：一是控制了雅丹地貌发育的阶段性；二是控制了雅丹地貌的空间分布范围。新构造运动在研究区内的表现以地壳的垂直运动为主，且具有阶段性和间歇性。

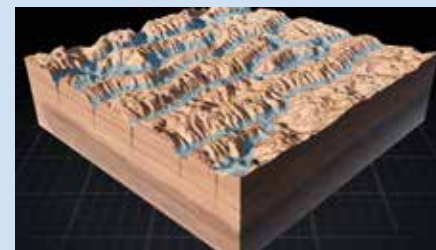


戈壁中的“蒙古包”——墙状雅丹

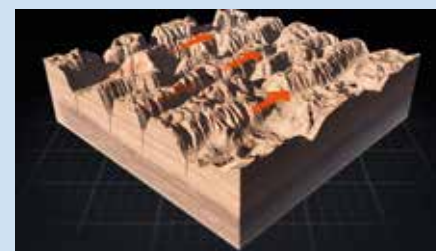
孕育期：地球内动力作用是这一时期的主导因素，属地表间歇性构造抬升的初始阶段。地表流水作用开始下切，河流阶地开始形成。地壳表层的构造活动，使地层中产生了垂直的裂隙（称为节理），它们为雅丹地貌的后期发育创造了条件。



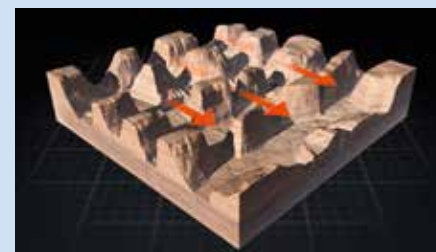
幼年期：幼年期以流水作用为主、风蚀作用为辅，两种作用都是沿着节理或裂隙侵蚀地表。随地表的抬升，侵蚀作用逐渐向下进行，使这些节理、裂隙不断加深、加宽，形成了较浅的沟槽，雅丹地貌的雏形开始出现。由于构造抬升和侵蚀深度有限，这一阶段的雅丹体比较低矮，形态单调。



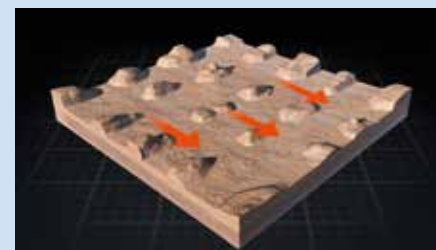
青年期：随着构造抬升和侵蚀作用的继续进行，地层中节理、裂隙的侵蚀宽度和深度进一步加大，雅丹体继续“长”高。受风力作用和季节性流水的影响，先期形成的雅丹体进一步被改造，形成了垄岗状雅丹。这一时期以风力侵蚀为主，是雅丹地貌发育的鼎盛时期。



壮年期：风和流水沿垄岗状雅丹体的横向节理或裂隙继续侵蚀，使垄岗状的雅丹体逐渐被分割，由整体裂生为毗邻的多个雅丹体，形成墙状、塔状雅丹体。雅丹体的高度也从这一时期开始逐渐降低。风蚀作用对该时期雅丹体形态的塑造最为明显。现今雅丹景区内大面积分布的雅丹体都属于这一时期的产物。



老年期：在地壳稳定时期，随着侵蚀作用的继续，雅丹体开始慢慢“萎缩”，墙状雅丹体继续分化为塔状、柱状。雅丹体的岩性差异、裂隙密度，以及侵蚀作用的强度等因素，使这种孤立的雅丹体的形态变化特别大，拟人似物的象形雅丹多形成于这一时期。该时期雅丹体的显著特征是单体更趋孤立，形态更生动，顶部趋于更圆或更尖，高度进一步降低，沿裂隙的崩塌作用明显加强。



消亡期：在重力作用下，孤立的雅丹体沿裂隙最后完全崩塌，进而成为雅丹残丘。随着风力侵蚀作用的继续，流水侵蚀、崩塌和物理风化作用共同导致雅丹体之间的沟谷不断加宽，最终形成宽阔的谷地，雅丹地貌最终消亡。



雅丹地貌形成演化模式图

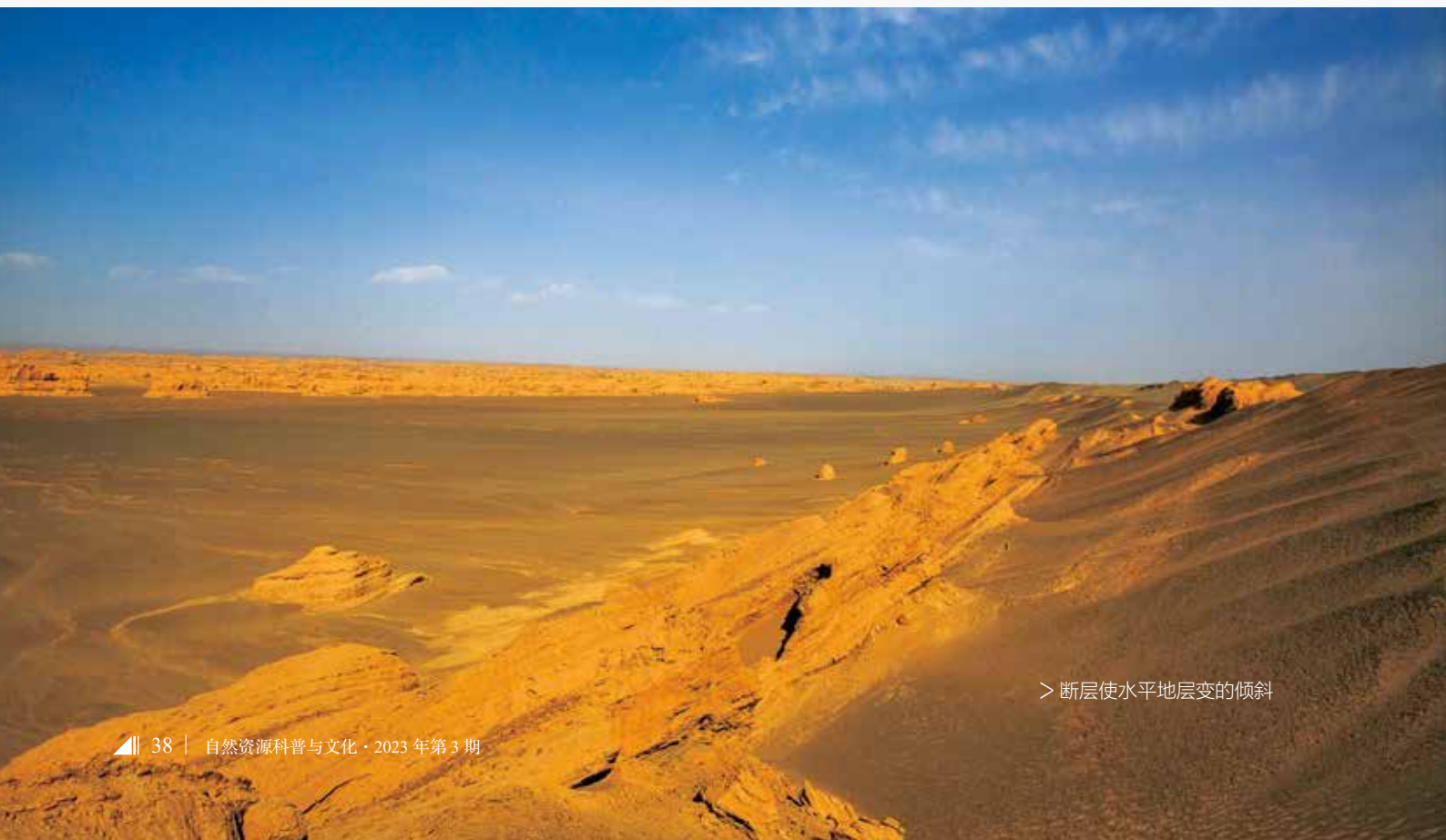
通过详细的野外调查，确认研究区发育三级河流阶地。大量的样品采集和室内测试分析，确定了三级阶地的年龄分别约为 10 万年、7 万年和 4 万年。可以大致认为，河流阶地顶部沉积物的年龄反映了新构造运动开始抬升的时间。根据敦煌雅丹地貌发育的特点，可以重塑雅丹地貌的形成演化历史，它经历了三个周期性的发育和发展过程，平均每个周期持续的时间约为 3 万年。在整个形成演化过程中，风蚀作用与流水侵蚀作用贯穿始终，而构造运动仅在雅丹地貌形成初期作用明显。

除了构造抬升以外，内动力地质作用对敦煌雅丹地貌的控制还表现在地层中节理、裂隙的形成，和边界断层活动导致的雅丹体变形。在雅丹地



＞ 蘑菇石——凸出的黏土层与凹进的砂质层构成的柱状雅丹

貌的孕育期，构造作用导致了地层中节理和裂隙的出现，这为后期外力地质作用沿节理、裂隙侵蚀并逐步塑造雅丹体的形态创造了条件。新构造运动产生的断层使附近的雅丹体地层由水平变为倾斜，这种活动在研究区南部边界表现更为明显。



＞ 断层使水平地层变为倾斜

外力控制作用

流水作用、风蚀作用和重力作用主导了雅丹地貌发育的不同时期。

流水作用对雅丹地貌形成的影响主要反映在雅丹地貌形成初期，表现在两个方面：一是促进了雅丹雏形的形成——雅丹景区北部雅丹体近于南北向延伸，而南部雅丹体则以东西方向延伸为主，这种雅丹地貌总体走向的巨大差异，一方面受初期节理走向的影响，另一方面也是地貌形成初期流水侵蚀作用的结果。二是加快了雅丹体的侵蚀速度——地表流水和大气降水不断侵蚀雅丹体表面和基部，从而不断改造了雅丹体的形态。

风蚀作用是塑造雅丹体形态的主要营力，包括风沙流的磨蚀作用和风的吹蚀作用。其中，风沙流的磨蚀作用在接近地面的部位最为强烈。因此，研究区内可见许多雅丹体底部在迎风端形成了向内凹的风蚀槽（坑）。风的吹蚀主要作用于固结较差的砂质层，使其形成了与上覆或下伏泥质层显著不同的形态。

重力作用使雅丹体沿节理、裂缝不断地崩落、坍塌，加速了雅丹地貌的发育过程。野外调查发现，由塔状、柱状雅丹体向残丘状雅丹体演化的过程中，重力是导致崩塌的主要作用形式。

综上所述，早在距今约 30 万年至 13 万年间，研究区气候干旱，距离物源区不远的河流和浅水湖泊形成的沉积物构成了雅丹地貌的物质基础。从距今约 10 万年前开始，敦煌雅丹地貌才真正开始形成。受新构造活动的控制，它经历了三个周期性的形成、发展和消亡的过程。在雅丹地貌形成全过程中，风蚀作用与流水侵蚀贯穿始终，构造运动仅在雅丹地貌形成初期作用明显。

10 万年的时间在地质历史长河中只能算

是瞬间。然而，就是在这瞬间雅丹地貌却经历了三次“生死”轮回。破坏与形成，废旧和立新，永远保持着平衡和循环。大自然按此规律向前行进着。回眸地质历史，敦煌雅丹地貌可谓“不沉的‘舰队’，永远的雅丹”！

本文由河北省高等学校“人文社会科学研究（编号：SQ2023233）”项目资助。

第一作者单位 / 河北经贸大学旅游学院

通信作者单位 / 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院

（本文编辑：陈 慧）



＞ 底部被强烈风蚀的柱状雅丹