



## 青藏高原的“碳”路行走： 探秘世界首例水光互补项目

Walking on the carbon road in Qinghai-Xizang Plateau: Exploring the secrets of the world's first water-solar complementary power generation project

■文、图 / 蓝虹

当生态环境部宣传教育中心组织的“碳”路中国青海站考察团向我发出邀请的时候,我非常激动地参加了。青海,对于我国甚至全球碳中和之路来说,都有着特别的意义,因为青海的龙羊峡水光互补电站是世界第一例水光互补项目。

### 一、水电和光伏的双向奔赴互相成就

一起要去青海的朋友问我,什么是水光互补项目呢?我说,水光互补是一种通过有效利用水电站的调节能力来平滑光伏发电出力波动的系统运行方式。看着朋友困惑的眼神,我接着解释,光伏发电由于受气象环境因素影响,比如,白天有太阳电力比较充足,晚上没有太阳电力很低,具有随机波动性特征,这会对电网的安全稳定运行造成威胁。朋友还是困惑,问,为什么这种波动性会对电网造成威胁呢?我想了想,说,这种太阳能发电的不稳定性,会导致电网电压波

动和闪变,你见过电压不稳定的情况吧,电灯泡忽明忽暗,最后全灭了。朋友点点头,说,明白了。

朋友认真听讲的态度引发了我作为教师的职业特性,我开始宣讲:水光互补就是通过水电和光伏发电的互相补偿,解决光伏发电出力不平稳的问题,提高电网的安全性。朋友点点头,说,那就是用水电解决光伏发电中存在的技术问题。我说,也对也不对。确实,光伏发电出力不平稳的问题,非常影响光伏发电的传输,所以,你看,有些地方出现了弃电的现象,因为担心电网损伤,所以有些光伏电传输不出去。水光互补项目,利用水电站水库巨大库容的调节能力,补充光伏发电的间歇,例如夜晚或者天气不好时电力出力不足的问题,消除了光伏电的波动性,使光伏电成为一种稳定的电能,降低了光伏出力波动对电网安全的影响,从而可以安全接入电网。这在一定程度上解决了光伏电的传输问题,减少了弃电量。而且,通过水

光互补项目,光伏电还可以便利地使用水电站原有的电网输送,极大地降低了输送成本。

朋友说,是呀,水电这枝绿叶就这样成就了光伏,让光伏电成为更好的自己了。我被朋友逗笑了,朋友是作家,什么都要朝爱情方面描述,感觉水电在和光伏电谈恋爱了。我笑着说,水电当然是成就了光伏电,但是,水电在这里也不只是做光伏电的绿叶,只是帮助光伏电,水光互补项目是水电和光伏的双向奔赴,互相成就。

看着朋友困惑的眼神,我的教师特性再次被激发,开始讲课。我说,光伏电也成就了水电呀。比如,在光伏发电充足的时候,水库就可以少放水,先将水储存在水库中。等到用电高峰期,再将这些额外储存的水放出去发电,以满足高峰期的用电需求,这个过程就叫做调峰。水电

因为与光伏的结合,获得了更强大的调峰能力,可以有能力应对更大的突发的用电高峰。而且,光伏电还可以弥补水电枯水期水容量的不足。你知道,枯水期,说明降雨减少,那阳光天就增多,光伏电供给充足,所以,这正是互相弥补、互相对冲呀。

我笑着说,水光互补,就是水电和光伏美好的爱情,双向奔赴,互相成就。而这种互相成就,带来的是供电量的增加。例如,我们马上要去青海考察的龙羊峡水光互补项目,通过“水光互补”,龙羊峡水电站送出线路年利用小时数由原来的4621小时提高到了5019小时;以龙羊峡“水光互补”光伏电站年均约14.94亿千瓦时的发电量计算,每年可节约标准煤约46.46万吨,减少二氧化碳排放约122.66万吨。

朋友点点头,说,听你说,咱们马上要去青海考察的龙羊峡水光互补项目,是全球第一个水光互补项目,是吗?我自豪地说,是呀,水光互补这个概念,就是国家电投集团黄河上游水电开发公司2012年在全球范围内首次提出的,并且在2013年开始建设落地。

我看了看朋友说,你也知道的,目前全球二氧化

碳的排放,90%以上是由化石能源燃烧产生的,所以,新能源革命,是解决气候危机,促进碳中和实现的关键必要环节,所以,这个水光互补技术,对于全球的新能源革命,意义真是非常重大。朋友叹息说,是呀,气候危机真是步步逼近了,北京2023年先是台风杜苏芮导致的暴雨水灾,后是连续高温,我虽然不是生态环境专家,也已经深深感受到了,真是需要立即马上采取行动。

## 二、考察深谷峻崖的龙羊峡水电站

在初秋的阳光,我们就这样奔赴了青海,开始了对龙羊峡水光互补项目的考察。

到了西宁,到底是高原城市,气温一下就降低了。我们换上了厚厚的旅行装,坐车从西西南行146公里,

就是世界闻名的龙羊峡水电站。陪同我们讲解的是国家电投集团黄河上游水电开发公司的专家,他说,龙羊最初是蒙古语,龙是沟谷的意思,羊是崇山峻岭的意思。原来是无人区,平均海拔



2600多米,人烟稀少,人迹罕至,只有游牧的蒙古人偶尔来这里,因为峡谷深峻,高山耸立,在一望无垠的大漠,是奇特的景观,所以,就把这里叫龙羊峡,有着崇山峻岭的峡谷。蒙古人离开后,有依稀的藏民偶尔到这里游牧,基本还是无人区。藏民们也按照蒙语,把这里叫龙羊。我说,所以,龙羊峡水库的建设,并没有像其他水库建设一样,有很多移民,因为龙羊这个地方,原本就是无人区,牧民很少。真是从选址开始就体现了人与自然的和谐共生呀。

黄河水电专家点点头,继续讲解说,龙羊峡水电站位于青海海南州共和县。有人马上提问,为什么叫海南州呢。是呀,海南不是在天之涯地之角的大海边吗?怎么又来到高原腹地这茫茫的大漠中呢。专家笑了,说,此海南非彼海南,海南州,全称是海南藏族自治州,这里的“海”是指青海湖,因为这里位于青海湖的南面,所以就被叫做“海南”。青海湖在蒙古语里被

称为“库库淖尔”，藏语里被称为“温布措”，意思是“青色的海”“蓝色的海洋”。

专家说，龙羊峡水电站的选址和建设，就是顺应自然、顺应地势，是人与自然和谐共生的产物。龙羊峡水电站距黄河发源地1684公里，距黄河入海口3376公里，是黄河上游第一座大型梯级电站，是黄河龙头电站。专家指着峡谷说，你们看，这是黄河流经青海大草原后，进入黄河峡谷区的峡谷。峡口只有30米宽，全长33公里。峡谷西部入口处海拔是2460米，东端出口处是2222米，河道天然落差就有近240米，两壁直立的全是坚硬的花岗岩岩石；一边是起伏险峻的茶纳山，一边是连绵不断的莽原，中间是一片宽阔平坦的盆地，使整个峡谷成为一个巨大的天然库区，到了峡口附近，突然峭壁陡立，两岸距离仅有30多米，但岸高近200米，这里真是建设水电站得天独厚的地方。专家说，所以，水电站的建设并没有大规模改变当地的原始生态，而是依自然地形地貌而建，顺应自然的地理形态。

我看着龙羊峡水电站巨大的水库库区，非常震撼。这是一座面积为383平方公里、总库容量达247亿立方米的超大型水库，整个水库的集水面积达到了13.14万平方公里，其水量相当于1700个西湖。水库的水非常碧绿幽深，在苍穹碧野、碧波荡漾中散发出神秘的气息。大家都在感叹黄河不是浑浊的吗，怎么到了这里，竟然清澈到如此地步。有同行的朋友向水库的水靠近，我赶快将她拉离。我经常外地考察，算是了解一些水的知识。比如，在深山里，会看到很平常的水潭，深幽碧绿，大家会开心地想到潭边喝水洗脸，我都会赶快拉开他们。水的颜色碧绿深邃到如此地步，那水深肯定是超过了200米，想想看，200米是怎样的深度呢，一层楼房大概是3米，200米就是67层楼的深度。这样的水深，水底有着多么神秘的生态世界，这样的水深，水如何不至清至幽至幻。我问黄河水电专家，水库的水深是多少，他说，水库的最深处超过了200米。果然和我预测的差不多。

黄河水电专家说，这座水库还有一个特性，使龙羊峡水电站发电量非常稳定。龙羊峡水库年平均温度7.5℃，是青藏高原上永不封冻的人工湖泊，即使寒冷的冬天也不影响发电。大家立即议论纷纷，因为青海海南州冬天是很冷的，龙羊峡所在的共和县冬天最冷可达零下20℃以上，而且寒冷季持续时间很长，从11

月基本就进入零下的温度了，一直持续到来年的5月。我说我知道原因，大家就催我快说，我说，因为水库水容量太大太深了呀。水是一种比热容比较大的液体，而且，水越深，里面的水就越不容易结冰。这是高原，白天有太阳照射的时候，因为水库容量很大，可以吸收的热量很多。到了晚上，虽然没有太阳热能会导致水库水温下降，但是，因为巨大的水库水容量，再加上比热容比较大，温度下降有限，不会降到0℃以下，而到了第二天，太阳出来，水库的水又开始吸收热能。

我看大家愣愣地看着我，就说，大家如果冬天把手伸进比较深的湖水中，是不是觉得很温暖呀，这就是比热容大的作用呀。大家纷纷点头。我说，龙羊峡水库有这样永不结冰的优势，是因为库深和水容量很大，而这样超过200米的幽深的水和巨大面积体积的水容量，还是因为龙羊峡特殊的地势，这就是顺应自然的力量而建呀。这样幽深和巨大的库容量，对于水光互补项目来说，就意味着很强大的调节能力，是形成良好的水光互补的非常重要的条件之一。

我们是专门来考察水光互补项目的，所以大家兴趣很大，问为什么呢？看着大家询问的眼光，我立即教师职业病上身，开始开讲。我说，水光互补发电是充分利用水电站已有输电线路通道和水电机组快速调节能力，将光伏发电和水电机组电力联合打捆送出，降低光伏发电波动性影响对电网的危害，提高电网利用率并增加发电量，但水光容量相匹配非常重要。这就好像好的爱情，必须旗鼓相当，才能双向奔赴，互相成就。水库的水容量在一定程度上决定了水电容量，也决定了水电可以在多大程度上调节光伏电昼夜和其他气候问题带来的光伏发电出力的巨大波动性。而且，光伏发电规模越大，要求水电的调节能力也越高。龙羊峡水电站这个丈夫，配对的妻子可是塔拉滩光伏电站，塔拉滩光伏电站占地面积相当于一个新加坡的国土面积，2022年的年发电量达144亿千瓦时。要站在这样的大女人背后做她的支撑，与其形成双向奔赴、互相成就的互补模式，龙羊峡水电站这个丈夫，必须有强大的库容量呀。只有水库库容量足够强大，才能在其晚上无法发电时，通过自身电力补充其电力出力，达到和白天电力出力一样的水平，才能在气候不好的冰雪阴冷天，替代太阳通过水势发电平衡其波动性。只有水库有强大的库容量，才能对光伏电形成兼容和包容，从而解决光伏发电的弃光难题和安全并

网问题。大家听后连连点头。

我看向两岸的峡谷,这是由沉积岩岩石组成,大自然用鬼斧神工的创造力,将其镌刻得岩层嶙峋,层峦叠嶂,气势磅礴,奇幽异险。这样幽深险峻的峡谷地势,也保障了黄河河流运行的平稳性。因为泥沙的淤积,黄河以易于改道而驰名,但是,根据地质考证,黄河形成已经有四万多年,龙羊峡谷的黄河河道在这四万多多年里从来没有改过道,这是保障龙羊峡水电站长期运行的重要地理条件。

我突然在峡谷的岩壁上,看到了几只岩羊。我眯起眼睛,用手机拍摄功能拉近放大,这好像是个岩羊家族呀,还有一只看起来非常小的小小岩羊,跟在妈妈身后,也在悬崖峭壁间调皮地奔走跳跃,在阳光下,享受生活的美好。这只小岩羊好可爱,可能刚出生不久,很活泼,很后悔忘带望远镜了。岩羊又叫石羊,通常以青草和各种灌木丛枝叶为食,但在茫茫大漠和崇山峻岭之间,这绿绿的青草显然是稀缺的东西,所以,它们需要在悬崖峭壁间攀登、跳跃,以寻求更多的食物,天长地久,它们就锻炼出了能够在岩石上自由跳跃的好身手。据说,岩羊的幼崽,出生十几天,就可以在崖壁上自由攀岩,被称为“岩壁上的精灵”。这只小小的岩羊,看它小小的身形,可能也只出生了十几天吧。

我正追着小小岩羊看得入神,突然,一只巨大的像老鹰一样的大鸟,俯冲下来,急促地抓起这只小小的岩羊,匆匆地飞走了。我呆住了,放下手机,傻傻地看着天空。我认出来了,这不是老鹰,这是一只大金雕。唉,国家一级保护动物在杀害国家二级保护动物,这是大型犯罪现场呀,可是,凶手来头太大,我怎么办?除了痛惜,无可奈何,我实在是喜欢这只可爱的小岩羊,太可怜了,可是,我知道大自然的法则,生态圈食物链,我们不能干涉,其实,我也干涉不了呀。

金雕是猛禽,典型的肉食鸟类。其实,我原来是很喜欢金雕的,因为它好像一位品性高傲的侠士,目光敏锐,两米多长的翼展,宛如匕首般的利爪,喜欢栖息在高山岩石峭壁之巅,或者空旷大漠的大树之上,或者在人迹罕至的深山,壁立千仞,雕矗立其上,御风而行,俯瞰广阔山野,是很有气势很有格调的猛禽,颇有侠士风范。但是,这次看见金雕捕猎小小岩羊,我立即对它的好感变为负值了,这哪里是侠士呀,有本事挑战小小岩羊妈妈呀,以猛禽之王的身位,去捕猎一只刚出生

的毫无还手之力的小小岩羊,太令人鄙视了。

小小岩羊被捕猎,让我情绪一下低落下来。同行的朋友拉着我说,你看,蓝教授,这水库的水质多好啊。黄河水电的专家说,是呀,龙羊峡水库的水质,一直保持在Ⅰ类水和Ⅱ类水之间,是可以直接饮用的。水库里养的三文鱼,因为龙羊峡水库的水质清冷清澈,味道和其他地方的鱼不同,最是美味了。大家都有点饿了,听到介绍,立即对龙羊峡水库的三文鱼充满了向往。看着大家馋馋的样子,带队的朋友说,咱们今天中午就去吃三文鱼,这里的三文鱼是好吃又便宜,只要大约18元1斤。

找了一家当地的小店,店家笑着介绍,三文鱼是不是来个本地特色的锅炕三文鱼呢,大家就愣住了,没吃过。不过,正因为没吃过,所以才要尝试呀。大家立即点头,说就要这个龙羊峡特色的锅炕三文鱼。店家又推荐,你们这么多人,是不是再来一道大肠炒肉。大肠炒肉?大家诧异地看着店家,这是什么搭配。和我们一起去的青海专家张主任赶快解释,大肠炒肉其实就是辣椒炒肉,大肠辣椒是青海特色的辣椒,其实就是一种螺旋椒,因为辣椒皮的皱褶很多,外形很像大肠,所以,此地就叫大肠辣椒。就有朋友问,和普通辣椒比,有什么特殊的味道吗?张主任说,更香更辣一些。我是畚族“山哈”,山里的人,所以,对辣的食物非常喜欢。

大家坐下来,等着美味上桌。店家拿出蜡烛,在桌子上点着了。为什么要点蜡烛呢,大家看看外面明晃晃的太阳,困惑地看着店家。店家说,这是为了驱赶蚊子。蚊子也是原生野地的特征呀,大家并没有反感。笑谈中,我们盼望已久的锅炕三文鱼终于上桌了,满满一大盆,真是壮观。我诧异地看着,感觉是用三文鱼做的大盘鸡。张主任说,其实,和大盘鸡的做法差不多。就是把洗净控干水分的三文鱼切块,锅里放适量的油烧热,放入洋葱、小米椒和大葱炒香,再把三文鱼放入翻炒,微微炒熟后加入适量的料酒和酱油,加入没过鱼肉的清水,用大火焖炖至收汁,就可以出锅吃了。

虽然做法看着像大盘鸡,但是,龙羊峡水库的三文鱼,实在是太好吃了。可能我是少数民族,始终喜欢比较油润的食物。龙羊峡的三文鱼太丰润了,特别是鱼肚子的地方,软软鲜香的肉质包裹着肥美的油脂,鱼肉散发着馥郁的鲜香,慢慢咀嚼,那种介乎肉感和油脂之间的奇妙味道,那种品尝美食的愉悦感,油然



而生。唉，人生就像这碗锅炕三文鱼，各种不相关的食材，却碰撞出温柔的缠绵，那种脂肪与温度结合的鲜美油润，你不知道，下一块会是什么味道。

### 三、探访全球最大的光伏基地： 塔拉滩光伏电站

考察了水光互补项目的丈夫，雄赳赳的龙羊峡水电站。我们要去考察这个水光互补项目的妻子，漫漫戈壁滩上的塔拉滩光伏电站。

车在一望无垠的漫漫大漠中开着，逐渐进入高原大漠的无人区，车行之处，一路都是长长的好像没有尽头的光伏之路，辽阔的高原上是一眼望不到边的“蓝色海洋”，鳞次栉比的光伏板在阳光下泛起层层“涟漪”，形成了一道亮丽的风景线。太空旷寂静了，太壮观了。

这里原来是茫茫戈壁荒滩，寸草不生，除了无边的漫天黄沙和炎热烈日，就是空旷寂寞，鸟兽无踪，就连植被都很难看到，渺无人烟，几乎没有人类活动。但现在，这里已建起全球装机容量最大的光伏发电园区——海南州生态光伏园。2022年的年发电量高达144亿千瓦时，真是荒漠戈壁中的奇迹。

2012年提出水光互补项目理念后，国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司就来到塔拉滩，开始利用荒漠化土地开发建设光伏发电园区。塔拉滩平均海拔2920米左右，尽管98.5%的面积都是沙化土地，但塔拉滩地势平坦，而且光能资源丰富，年均日照时

间近3000小时，适合大面积建设光伏电站。戈壁滩的疯狂大风和炙热太阳，是导致戈壁滩成为无人区的重要原因，但高海拔意味着日光高辐射，终年干旱少雨，是寸草不生的原因，但也导致了当地每天平均日照时间长达8小时以上，每年光照时间超过1800小时。大自然的一切都是最好的安排。塔拉滩原本恶劣的自然条件，却是开发光伏的优势资源。

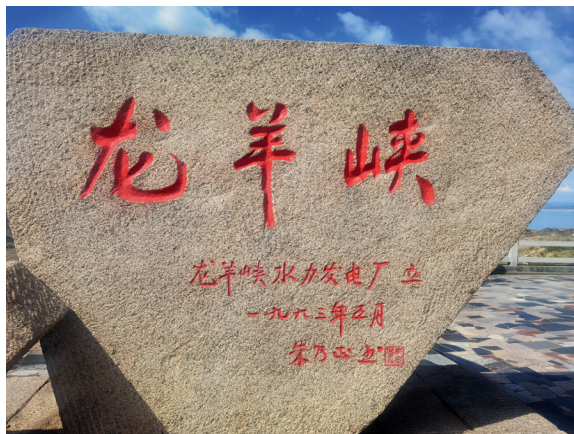
经过十年的奋斗，塔拉滩陆续安装了700多万块光伏板，装机容量达到2.2吉瓦，成为全球装机容量最大的光伏发电园区。光伏基地总面积已经达到600多平方公里，几乎相当于新加坡的国土面积。但这么大的光伏电输出是一个难题。光伏发电的“不稳定性”会严重损害电网的安全。给我们介绍的光伏基地专家说，如果刚好有一片云飘过来，遮住阳光，都会导致发电量瞬间下降。如果不进行相应调节，就可能会造成电网大面积脱网事故。一片云的飘过，都可能引发电网大面积脱网事故，那夜晚整夜没有太阳，或者其他气候原因导致的风雪阴暗天气，导致的电压不稳定性就更加强烈，由此带来的对电网的损害更大，会导致电网瘫痪，电力根本输送不出去。

所以，水光互补项目，对这个大型光伏电站的开发非常重要，不然，即使发了大量的光伏电，但因为光伏不稳定性导致电网瘫痪，就会产生不得已的弃电行为，这巨大投资规模的全球最大光伏基地就无法发挥作用了。“水光互补技术”正是将光伏电站和水电站整体作为“虚拟水电”进行综合运行控制，借助灵活、稳定的水

电,用水电调节光伏的波动性,将原本不稳定的光伏电源调节为稳定、优质、安全和电网友好的电源后,送入电网。正是龙羊峡水电站巨大的调节库容,才包容和支持了世界最大的光伏基地的正常运转。

光伏发电的不稳定性,几乎已经成为世界级的难题。只能在白天发电,晚上没有太阳不能发电,还很容易受到气候影响,例如阴天、下雪、沙尘暴等,都会导致光电出现波动性,所以不能直接接入电网。龙羊峡水光互补项目,利用水电项目快速启停的特点,运用巨大库容的调节能力,补充光伏发电因为夜晚或者气候原因导致的发电间歇,消除波动性,成为一种稳定的电能,从而可以安全接入电网,输出稳定均衡的电能。一条条高压输电线路连接着龙羊峡的水和塔拉滩的光。光伏园区将电压升高到330千伏后,通过五十多公里的高压线路,输送到龙羊峡水电站。水电站再根据发电任务和光伏实时发电量调节水电,依托水电机组快速调节能力,只需几秒钟就能对光伏电的变化做出反应,削峰填谷,形成稳定电能,最终并网向外输送。这种水光互补技术,是我国的首创,也是我国对全球碳中和做出的贡献。

而光伏牧场和光伏羊,则是以光伏治理沙漠的典范了。光伏基地的专家说,最初引进光伏羊,是为了解决沙漠戈壁中的光伏电的难题。在安装好太阳能板后,塔拉滩光伏发电站便正式启动,但由于当地风沙较大,光伏板很容易被覆盖上大量的尘土,降低光电转化率,没办法,运营管理人员只能定期从36公里外的黄河河道中取水清理。随着时间的推移,人们发现原本荒芜的土壤中竟然冒出了青嫩的绿草,专家们认为,这一方面是人为清理光伏板的水流入地面,给荒芜的土壤带来了珍贵的水资源;另一方面则是光伏板不仅能遮挡阳



光,减少土壤30%的水分蒸发量,还能降低周围50%的风速,大幅度削弱了大自然的风蚀作用,帮助土壤保留了水汽,并且在昼夜温差大的荒漠,光伏板在早上还会凝结很多露珠,给下面的绿植提供水分。

专家们发现绿色植被的生长对光伏发电有很大的好处。光伏板下生长的绿的植被,可以减少水分蒸发,降低光伏板表面温度,从而提高光电的转换效率。因为光伏板有温度系数,温度越高,发电效率就越低。另外,光伏板下的绿色植被的生长,还可以提高光伏电板的寿命。所以,光伏基地的人们就开始主动撒草籽促进光伏板下草地植被的生长。

但是,没过多久,小草的高度就超过了光伏板的高度,也就是说,草遮盖了光伏板,降低了光电转化效率,而且,一旦到了冬季,枯萎的草很容易引发火灾。这就要求光伏板下需要有草地,但草的高度还不能超过光伏板的高度。这样难的剪草操作,也就是羊最适合了。因为草的尖尖比较嫩,因此,理性的羊,在牧草不缺乏的情况下,会吃掉嫩嫩的草尖尖,而留下草茎和草根。既不会伤害到草场,又可以保持草的高度不超过光伏板的高度。

光伏基地的专家骄傲地说,看,这就是光伏牧场和光伏羊的来历了。目前有2万多只羊自由地栖息在这里惬意生活。光伏羊成为了不拿工资的义务除草工,羊粪还是天然肥料,实现了光伏园区的生态循环,在这放羊的牧民也成为了“光伏羊倌”,他们接受基地的工资,增加了收入。这水与光的梦幻联动,还衍生了光伏牧场和光伏羊。

光伏基地的专家还邀请我们登上了光伏塔。站在塔上,那一片光伏蓝海呀,超过700万块深蓝色光伏板在绿色草甸上展开,在晚霞中闪烁着动人的蓝光,真是一眼望不到头的蓝色光伏海呀。当光伏与黄沙相遇,碰撞出的火花竟然如此热烈。昔日的的不毛之地,如今成为了与自然共生的光伏蓝海。

晚上,我们吃的就是光伏羊。高原的夜晚,已经很寒冷了,大家围坐在火炉边,吃着热腾腾的羊肉火锅,听着屋外风萧萧的长鸣,在蒙蒙的夜色中,我们好像在感受着这个神秘高原的前世今生,而我浓情的爱恋,也在这潇潇大漠中弥漫,是那么强烈,这让人着迷的大自然呀。☞

**作者简介:**中国人民大学环境学院教授、博士生导师,中国散文学会会员